

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.**



6-6-01

GP 3746

Attorney Docket No: P-6150

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

In re Application of:)
Carlo RUBBIA)
Serial No.: 09/782,558)
Filed: February 13, 2001)
Title: METHOD AND DEVICE FOR)
HEATING GAS FROM A THIN)
LAYER OF NUCLEAR FUEL,)
AND SPACE ENGINE USING)
SUCH METHOD)
Group Art Unit: 3746)
Examiner: Unassigned)

"Express Mail" mailing label number EL843426319US

Date of Deposit June 5, 2001

I hereby certify that this paper or fee is being deposited with the United States Postal Service "Express Mail Post Office to Addressee" service under 37 CFR § 1.10 on the date indicated above and is addressed to the Assistant Commissioner for Patents, Washington, D.C. 20231.

Stephanie Warner-Wallace

(Typed or printed name of person mailing paper or fee)

Stephanie Warner-Wallace
(Signature of person mailing paper or fee)

TRANSMITTAL LETTER

RECEIVED

JUN 11 2001

TECHNOLOGY CENTER R3700

Attention:
Assistant Commissioner for patents
Washington, D.C. 20231

Dear Sirs:

Transmitted herewith in the above-identified application are the following documents:

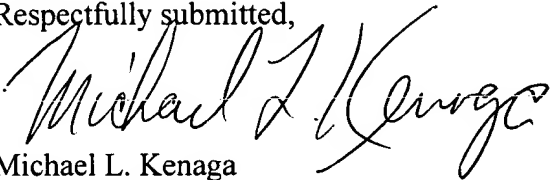
1. Certified Copy of Priority Document - Italian Application No. RM2000A000521
2. Return postcard acknowledging receipt.

Applicant: Carlo RUBBIA
Serial No.: 09/782,558
Page 2

No fee is required.

The Commissioner is hereby authorized to charge any deficiency or credit any overpayment to Deposit Account No. 18-2284 of Piper Marbury Rudnick & Wolfe. This sheet is transmitted in duplicate.

Respectfully submitted,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Michael L. Kenaga", written in a cursive style.

Michael L. Kenaga
Reg. No. 34,639

PIPER MARBURY RUDNICK & WOLFE
P.O. Box 64807
Chicago, Illinois 60664-0807
(312) 368-4000



MINISTERO DELL'INDUSTRIA, DEL COMMERCIO E DELL'ARTIGIANATO

DIREZIONE GENERALE DELLA PRODUZIONE INDUSTRIALE
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI



Autenticazione di copia di documenti relativi alla domanda di brevetto per Invenzione Industriale

N.
RM2000 A 000521

RECEIVED

JUN 11 2001

TECHNOLOGY CENTER R3700

*Si dichiara che l'unita copia è conforme ai documenti originali
depositati con la domanda di brevetto sopraspecificata, i cui dati
risultano dall'accluso processo verbale di deposito*

R ma, li 21 MAR. 2001

IL DIRETTORE DELLA DIVISIONE

Ing. Giorgio ROMANI

Giorgio Romani



A. RICHIEDENTE (I)

1) Denominazione **RUBBIA, Carlo**Residenza **GINEVRA / CH**

codice

2) Denominazione **ENEA - ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E L'AMBIENTE**Residenza **ROMA / IT**

codice

B. RAPPRESENTANTE DEL RICHIEDENTE PRESSO L'U.I.B.M.

cognome e nome **SARPI Maurizio, MANNI Lina, FEZZARDI Antonio**

denominazione studio di appartenenza

STUDIO FERRARIOvia **Cöllina**

n.

36

città

cap

00187

(prov)

RM

C. DOMICILIO ELETTIVO destinatario

Vedi sopra.

via

n.

città

cap

(prov)

D. TITOLO

classe proposta (sez/cl/sci)

gruppo/sottogruppo

**" METODO E DISPOSITIVO PER RISCALDARE GAS DA UNO STRATO SOTTILE DI
 COMBUSTIBILE NUCLEARE E PROPULSORE SPAZIALE CHE UTILIZZA TALE ME
 TODO "**

ANTICIPATA ACCESSIBILITÀ AL PUBBLICO: SI ☐ NO ☒

SE ISTANZA: DATA

N° PROTOCOLLO

E. INVENTORI DESIGNATI

cognome nome

cognome nome

1) **RUBBIA, Carlo**

3)

2)

4)

F. PRIORITÀ

nazione o organizzazione

tipo di priorità

numero di domanda

data di deposito

allegato
S/R1) **NESSUNA**

2)

SCIOGLIMENTO RISERVE

Data

N° Protocollo

G. CENTRO ABILITATO DI RACCOLTA COLTURE DI MICRORGANISMI, denominazione

H. ANNOTAZIONI SPECIALI

DOCUMENTAZIONE ALLEGATA

N. es.

Doc. 1) **1****PROV**n. pag. **97**

riassunto con disegno principale, descrizione e rivendicazioni (obbligatorio 1 esemplare)

Doc. 2) **1****PROV**n. tav. **24**

disegno (obbligatorio se citato in descrizione, 1 esemplare)

Doc. 3) **0****RIS**lettera d'incarico, ~~non deve essere presentata~~Doc. 4) **1****RIS**

designazione inventore

Doc. 5) **0****RIS**

documenti di priorità con traduzione in italiano

Doc. 6) **0****RIS**

autorizzazione o atto di cessione

Doc. 7) **0**

nominativo completo del richiedente

8) attestati di versamento, totale lire

1.415.000. =

obbligatorio

COMPILATO IL **28/09/2000**

FIRMA DEL (I) RICHIEDENTE (I)

SARPI MaurizioCONTINUA SINO **NO****dello STUDIO FERRARIO**DEL PRESENTE ATTO SI RICHIEDE COPIA AUTENTICA SINO **SI**

CAMERA DI COMMERCIO INDUSTRIA ARTIGIANATO E AGRICOLTURA - ROMA

codice **58**

VERBALE DI DEPOSITO

NUMERO DI DOMANDA

RM 2000 A 000521

Reg. A

L'anno millenovecento

DUEMILA

il giorno

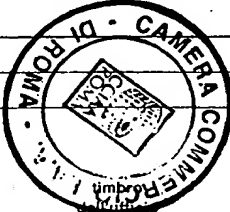
VENTOTTO

del mese di

SETTEMBREil (i) richiedente (i) sopraindicato (i) ha (hanno) presentato a me sottoscritto la presente domanda, corredata di n. **00** fogli aggiuntivi per la concessione del brevetto sopraportato.

I. ANNOTAZIONI VARIE DELL'UFFICIO ROGANTE

IL DEPOSITANTE



L'UFFICIALE ROGANTE

L'Ufficiale Rogante**Silvia Altieri**

RIASSUNTO INVENZIONE CON DISEGNO PRINCIPALE

NUMERO DOMANDA

NUMERO BREVETTO

A. RICHIEDENTE (I)

REG. 1

DATA DI DEPOSITO

DATA DI DEPOSITO

RM 2000 A 000521.

Denominazione

Carlo RUBBIA; ed ENEA - Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente.

Residenza

Chemin des Tulipiers n. 9, Ginevra 1208 - Svizzera; e Lungotever
Grande Ammiraglio Thaon di Revel n. 76, Roma - Italia.

D. TITOLO **METODO E DISPOSITIVO PER RISCALDARE GAS DA UNO STRATO
SOTTILE DI COMBUSTIBILE NUCLEARE E PROPULSORE SPAZIALE CHE
UTILIZZA TALE METODO.**

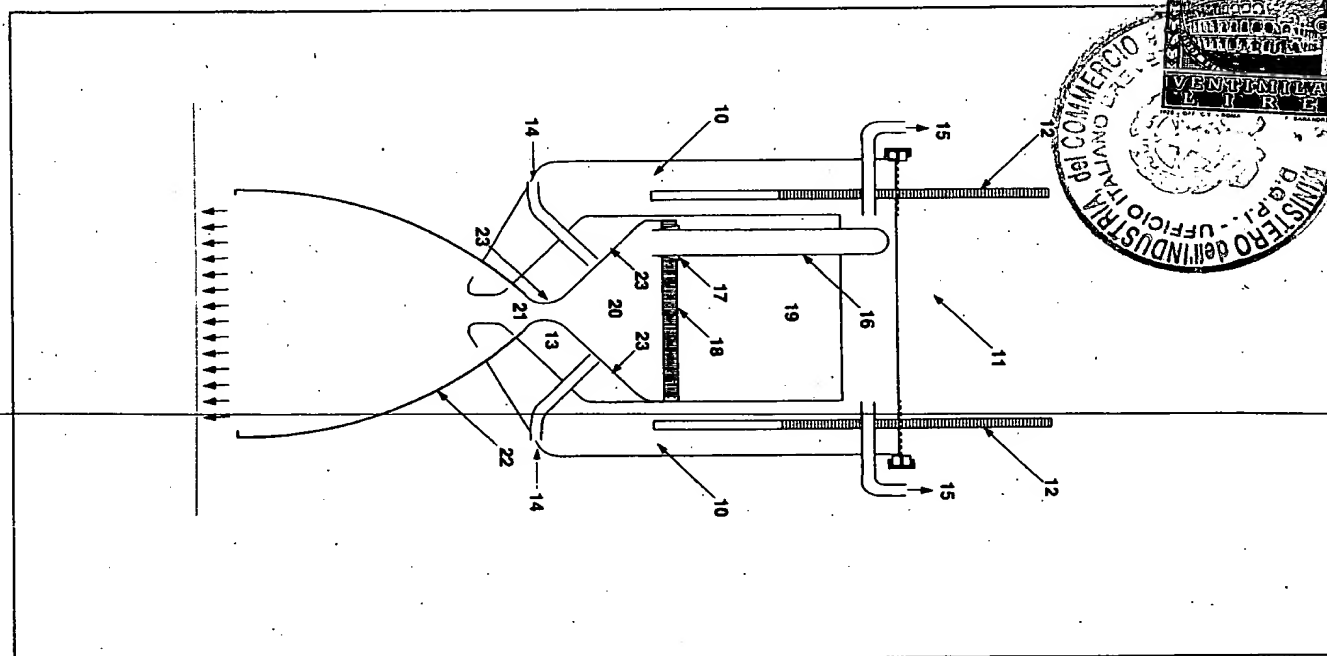
Classe proposta (sez./cl./scf)

(gruppo/sottogruppo)

L. RIASSUNTO

Un gas, per esempio idrogeno, a pressione relativamente bassa è riscaldato direttamente da frammenti di fissione (FF) emessi da uno strato sottile di materiale fissile, per esempio ^{242}mAm , depositato sulla parete interna di una camera che è mantenuta raffreddata ad una temperatura tipica di circa 1.000/1.500 K. Il gas è preferibilmente emesso sotto forma di flusso capillare dalle pareti di tubi cilindrici. La sua temperatura cresce progressivamente fino a raggiungere un valore di equilibrio dell'ordine di 9.500 K, a cui il riscaldamento mediante FF ed il raffreddamento per irraggiamento si bilanciano. Con una densità di potenza superficiale relativamente modesta sullo strato fissile pari a 200 W/cm², la potenza specifica mediata sul volume erogata al gas H può raggiungere 0,66 MWatt/g. Potenze di riscaldamento dell'ordine del megawatt per ogni grammo di gas sono pertanto possibili con riscaldamento superficiale dello strato accettabile. Il metodo di riscaldamento del gas può essere usato nei motori dei razzi per la propulsione nello spazio profondo.

M. DISEGNO



RM2000 A 000521

Descrizione dell'invenzione industriale avente per titolo: METODO E DISPOSITIVO PER RISCALDARE GAS DA UNO STRATO SOTTILE DI COMBUSTIBILE NUCLEARE E PROPULSORE SPAZIALE CHE UTILIZZA TALE METODO.

A nome di: Prof. Carlo Rubbia, di nazionalità italiana con residenza in Chemin des Tulipiers n. 9, Ginevra 1208 - Svizzera, e di: ENEA - Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente, di nazionalità italiana con sede in Lungotevere Grande Ammiraglio Thaon di Revel n. 76, Roma 00196 - Italia.

Inventore: Carlo Rubbia

DESCRIZIONE

La presente invenzione riguarda l'uso della fissione nucleare per riscaldare gas. Essa ha applicazioni in particolare nel campo della propulsione dei razzi nello spazio profondo.

Se l'energia nucleare è attualmente in competizione con altri metodi sulla Terra, per i viaggi nello spazio profondo essa presenta caratteristiche uniche, che la rendono praticamente indispensabile per conseguire gli obiettivi di missioni a lunga distanza come l'esplorazione umana di Marte, dei satelliti dei pianeti esterni e degli Asteroidi.

La fissione indotta da neutroni è la reazione nucleare più conveniente per la produzione di energia nelle applicazioni pratiche, per effetto (1) della sua resa energetica notevole (≈ 200 MeV) e (2) della sua capacità di sostenere la reazione con i neutroni secondari.

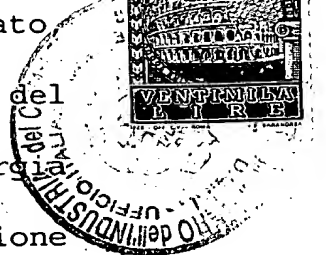
L'attuale stato dell'arte della propulsione spaziale nucleare è rappresentato, per esempio, dal progetto NERVA (vedi "Nuclear thermal rockets: next step to space" - "Razzi termici nucleari: prossimo passo verso lo spazio", Aerospace America, giugno 1989, pagine 16-29; oppure R.W. Bussard et al. "Nuclear Rocket Propulsion" - "Propulsione nucleare nei razzi", McGraw-Hill, New York, 1958). Nel progetto NERVA, l'energia prodotta dalla reazione di fissione è recuperata sotto forma di calore ad alta temperatura dalle barre di combustibile. Per assicurare il flusso di calore dal combustibile al gas propellente, la temperatura del gas propellente deve essere alquanto inferiore alla temperatura operativa del combustibile, a sua volta limitata dalla resistenza meccanica e dalla stabilità delle barre di combustibile alle alte temperature. Inoltre, per assicurare un buon trasferimento di calore al propellente, la pressione del gas ad alta

temperatura deve essere molto elevata, dell'ordine di 150 bar.

La velocità di scarico v_{sc} del motore di un razzo è limitata dall'entalpia e dalla temperatura finale della reazione di produzione dell'energia ed è proporzionale al cosiddetto impulso specifico. L'impulso specifico è definito da $I_{sp} = v_{sc}/g$, dove $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ è la costante gravitazionale. Esso rappresenta la durata durante la quale una data massa di propellente può esercitare una forza di spinta uguale al suo peso. I motori chimici per razzi, che fanno uso di idrogeno ed ossigeno liquidi, operano di solito a temperature di scarico di 3.600 K sotto condizioni stechiometriche, con un peso molecolare effettivo di circa $A = 11$, che limita l'impulso specifico a circa 450 s. I motori del tipo NERVA hanno prestazioni alquanto migliori di quelle dei motori chimici e forniscono un impulso specifico più elevato pari a circa 950 s. Tuttavia, il vantaggio è principalmente dovuto alla diminuzione del peso molecolare effettivo (l'impulso specifico è proporzionale a $1/\sqrt{A}$) dovuta all'uso di idrogeno gassoso puro ($A = 2$ contro $A = 11$) piuttosto che ad un aumento della temperatura di scarico.

Di fatto ci si attende che i razzi NERVA lavorino a temperature inferiori a quelle dei razzi chimici (3.000 K) a causa, come già evidenziato delle limitazioni dei materiali del nocciolo del reattore. L'enorme quantità di energia potenzialmente disponibile dal processo di fissione rimane largamente inutilizzata a causa (1) dei vincoli dimensionali associati alla massa critica minima richiesta per sostenere la reazione di fissione a catena e (2) della difficoltà di estrarre calore a temperature sufficientemente elevate dal reattore. Ciò nonostante, il motore NERVA è spesso citato come il solo motore che può fino ad oggi realisticamente essere candidato per un viaggio umano su Marte.

Il motore NERVA è fondamentalmente un reattore veloce non schermato, il che costituisce un serio inconveniente dei motori nucleari per la propulsione nello spazio. Si consideri per esempio la serie di tre motori NERVA, come descritto in un recente rapporto della NASA riguardo ad una missione su Marte ("Human Exploration of Mars: The Reference Mission of the NASA Mars Exploration Study Team" - "Esplorazione Umana di Marte: Missione di Riferimento del Gruppo di Studio



dell'Esplorazione di Marte della NASA", comprendente l'Addendum V3.0, giugno 1998, NASA SP 6107, 1997). La potenza installata è quasi 1 GWatt e circa $3,2 \times 10^{19}$ neutroni veloci/s saranno emessi dai motori. La dose standard ammessa ≤ 10 n/cm²/s, si raggiunge soltanto ad una distanza non schermata di 5.000 km.

Inoltre, l'emissione di neutroni renderà problematico anche il funzionamento contemporaneo di più motori NERVA disposti uno vicino all'altro, come nel summenzionato rapporto. In effetti, un reattore -anche se spento dalle barre di controllo- è ancora un dispositivo di moltiplicazione sottocritico e produrrà potenza se irraggiato dai neutroni dei motori vicini. Per esempio, se solo l'1% dei neutroni di un motore raggiunge l'unità confinante spenta a $k = 0,99$, quest'ultima si porta a piena potenza. Se essa è già in funzione, il contributo addizionale dei neutroni sarà sufficiente renderla prontocritica. Il sistema di controllo accoppiato per reattori che ~~interferiscono reciprocamente è, a nostro avviso,~~ un vero incubo e non è realistico in una missione spaziale effettuata dall'uomo.

In un motore da usare per un viaggio

interplanetario, il flusso residuo di neutroni all'esterno del motore dovrebbe essere sufficientemente basso da permettere il funzionamento del motore ad una distanza non troppo elevata dalla Stazione Spaziale (ISS) che si considera come il "punto di attracco" principale per il viaggio interplanetario. Inoltre, anche la dose ricevuta all'equipaggio dovrebbe essere piccola rispetto alla dose inevitabile dovuta alla radiazione di fondo dei raggi cosmici, che ammonta a circa 40 rad/y.

Le caratteristiche potenziali dei vari dispositivi nucleari per un motore di Propulsione Spaziale con potenzialità superiori a quelle del NERVA, sono state illustrate da diversi lavori (T. Kammash, ed., "Fusion Energy in Space Propulsion" - "Energia da Fusione nella Propulsione Spaziale", AIAA Progress in Astron. And Aeron., Vol. 167, AIAA, NY, 1995; oppure N.R. Schulze, "The NASA-LEWIS Program on Fusion Energy for Space Power and Propulsion" - "Programma NASA-LEWIS sull'Energia da Fusione per Potenza e Propulsione Spaziale", Fusion Technology, 19-1, pagine 11-28, 1991). Essi sono prevalentemente basati sulla fusione invece che sulla fissione, principalmente perché questo

processo permette l'uso di prodotti di reazione carichi per riscaldare direttamente il gas di scarico a temperature elevate sotto forma di plasma.

Sia la fusione inerziale sia la fusione controllata magneticamente sono state ampiamente studiate. La scelta della fusione come riferimento è stata pilotata dall'ovvia argomentazione, che i prodotti di reazione ionizzanti, che sono usati per riscaldare il propellente, sono molto più facili da estrarre da un dispositivo per la fusione controllata magneticamente (MC) o a fusione inerziale (IF).

Tuttavia, enormi problemi teorici e tecnologici hanno finora ostacolato la realizzazione di un dispositivo a fusione utilizzabile per la produzione di energia sulla Terra e a maggior ragione nello spazio. Le macchine a fusione, in particolare MC, sono necessariamente dispositivi molto grandi, di tecnologia molto complessa e difficilmente adatti alle condizioni di un lungo viaggio interplanetario.

Un altro concetto della propulsione nucleare, basato sulla fissione, è la cosiddetta propulsione con nocciolo a plasma. Si fa menzione del sistema

a flusso coassiale e dei motori nucleari a lampadina (vedi R. Ragsdale et al., «Gas Core Rocket Reactors - a New Look » - Reattori con nocciolo gassoso per Razzi - rivisitazione del concetto, NASA TM X-67823, 1971; e J.D. CLEMENT al., «Gas Core Reactor Technology » Tecnologia dei Reattori con nocciolo gassoso, Reactor Technol. 13-3, 1970). In questi dispositivi, il materiale fissile (^{235}U arricchito) viene scaldato alle temperature caratteristiche del plasma, fino a 50.000 K e la sua radiazione è usata per riscaldare l'idrogeno gassoso. Questo non è un compito banale, giacché l'idrogeno e la maggior parte degli altri gas leggeri sono otticamente trasparenti a temperature inferiori a circa 15.000 K, salvo che alla propria linea di assorbimento.

Un reattore al plasma a flusso coassiale per la propulsione spaziale dovrebbe operare tipicamente alla potenza di 6.000 MWatt, producendo $I_{sp} = 4.000$ s. Il diametro della cavità è circa 4 m, la pressione varia nell'intervallo da 400 a 600 bar ed il peso totale è dell'ordine di 500 tonnellate. La massa critica è compresa tra 40' e 80 kg di ^{235}U . Non è chiaro come all'avviamento tale massa possa essere portata dallo stato solido allo



stato di plasma.

Il concetto nucleare a lampadina, a differenza del sistema a flusso coassiale, assicura il contenimento completo del combustibile entro una struttura realizzata con pareti trasparenti raffreddate internamente. Si evita così il problema della miscelazione del combustibile con il propellente, e la conseguente perdita nello scarico. Il plasma dove hanno luogo le fissioni è tenuto lontano dalle pareti trasparenti mediante l'interposizione di un flusso vorticoso di gas iniettato tangenzialmente. Questo gas viene rimesso in ciclo previo recupero dell'uranio trascinato che viene rimesso in ciclo nel plasma. Per il resto, il principio di funzionamento è lo stesso del reattore al plasma a flusso coassiale. Dati tipici del motore nucleare a lampadina sono: potenza 4.600 MWatt; $I_{sp} = 1.870$ s; peso 35 tonnellate; limite della temperatura del combustibile 5.000 K e pressione 500 bar.

Questi concetti sono stati oggetto di ~~dettagliate ricerche, sebbene non sia stato~~ eseguito alcun test. Si possono prevedere difficoltà tecnologiche di cui la principale è il controllo della criticità del plasma dell'uranio.

Infatti una variazione del fattore di moltiplicazione $\leq 0,7\%$ -se non compensata prontamente dalle barre di controllo- porterebbe ad un incidente dovuto alla prontocriticità. Per un materiale fissile spesso e trascurando gli effetti del riflettore, la massa critica è proporzionale all'inverso della densità al quadrato. Inoltre, le sezioni d'urto e quindi la massa critica sono funzioni della temperatura. Non è poi chiaro come un sistema di controllo efficace e sicuro possa essere realizzato in presenza del rapido movimento del nocciolo gassoso interno (plasma fissile e gas circostante) e dell'eventuale insorgere delle instabilità idrodinamiche.

Un obiettivo della presente invenzione è proporre un modo alternativo di riscaldare gas per mezzo di reazioni di fissione nucleare adeguato ad applicazioni relative alla propulsione spaziale.

RIASSUNTO DELL'INVENZIONE

L'invenzione propone un metodo di riscaldamento di un gas, in cui il gas viene introdotto in almeno una camera avente una parete rivestita con materiale fissile, ed il materiale fissile è esposto ad un flusso di neutroni per

indurre la fissione, causando così il rilascio di frammenti di fissione nella camera.

Una parte importante dell'energia indotta dalla fissione si sprigiona sotto forma di energia cinetica dei frammenti di fissione (FF). Il rivestimento fissile della camera fornisce un combustibile essenzialmente bidimensionale, in maniera che una porzione significativa degli FF sia espulsa fuori dallo strato verso il volume contenente il gas. Quindi, l'energia cinetica degli FF è trasferita al gas per riscaldarlo in maniera molto efficace.

La fissione è preferibilmente indotta in condizioni critiche, sebbene possano essere anche considerate soluzioni sottocritiche.

La parete della camera è raffreddata sulla superficie esterna rispetto alla camera ed al rivestimento di materiale fissile. Il mezzo di raffreddamento può essere un metallo fuso quale il ${}^7\text{Li}$.

In una tipica forma di realizzazione, il rivestimento di materiale fissile ha un contenuto fissile inferiore a 10 mg/cm^2 , preferibilmente compreso nel campo da 1 a 3 mg/cm^2 , fornendo un compromesso ottimale fra le condizioni per

sostenere la reazione di fissione e quelle per il rilascio degli FF.

L'isotopo fissile più indicato per il rivestimento di materiale fissile è ^{242}mAm . Altri isotopi utilizzabili sono ^{233}U , ^{235}U e ^{239}Pu . Il materiale fissile può essere sotto forma di carburi.

Allo scopo di accrescere l'efficienza dei neutroni, la camera, per esempio di forma cilindrica, è situata all'interno di un involucro circondato da un riflettore di neutroni comprendente, per esempio, carbonio, berillio e/o ossido di berillio. Nelle soluzioni tipo, per ricevere il gas riscaldato, vi sarà una pluralità di camere all'interno dell'involucro circondato dal riflettore di neutroni. In una forma vantaggiosa di realizzazione, il riflettore di neutroni comprende, attorno all'involucro, uno spessore di materiale a base di carbonio di almeno 50/d (in cm) e preferibilmente di almeno 150/d, dove d è la densità del materiale a base di carbonio espressa in g/cm³.

Per controllare la reazione di fissione, il riflettore di neutroni può avere cavità per accogliere barre di controllo mobili di materiale



che assorbe neutroni.

In una applicazione del metodo al motore di un razzo, la camera è in comunicazione con un ugello di scarico attraverso una gola realizzata nel riflettore di neutroni. L'involucro può avere una regione del combustibile dove è situata la camera ed una regione di raccolta del gas caldo fra la regione del combustibile e la gola. Un fluido di raffreddamento è fatto circolare in un circuito avente una prima parte sulla faccia del riflettore di neutroni, adiacente alla regione di raccolta del gas caldo, ed una seconda parte situata nella regione del combustibile e separata dalla regione di raccolta del gas caldo mediante un setto divisorio in cui è realizzata un'apertura, nella quale è inserita una estremità aperta, della parete rivestita della camera. La parete rivestita della camera separa la camera dalla seconda parte del circuito di raffreddamento all'interno della regione del combustibile.

La parete della camera è opportunamente realizzata con un materiale poroso, per esempio un materiale a base di carbonio. Il gas può essere poi introdotto attraverso pori del materiale poroso della parete. Questa parete è preferibilmente

rivestita con uno strato a tenuta di gas (per esempio carburo di titanio) su una sua faccia esterna rispetto alla camera ed al rivestimento di materiale fissile. Tale strato può anche isolare il materiale della parete della camera dall'agente di raffreddamento adiacente.

Un altro aspetto dell'invenzione riguarda un dispositivo di riscaldamento di un gas per attuare il metodo sopra delineato. Tale dispositivo comprende almeno una camera per contenere gas, avente una parete rivestita con materiale fissile, e mezzi per esporre il materiale fissile ad un flusso di neutroni per indurre la fissione ed il rilascio di frammenti di fissione nella camera.

Un altro aspetto dell'invenzione concerne un motore spaziale comprendente un dispositivo di riscaldamento di un gas come sopra definito e mezzi per espellere il gas riscaldato nello spazio per generare una spinta.

L'uso diretto degli FF per riscaldare un propellente (di solito idrogeno) a basso peso molecolare non soffre delle limitazioni dell'energia e dei materiali imposte ai motori chimici e NERVA. Il motore si basa su (1) un gas molto caldo ed una configurazione di combustibile

freddo e (2) una quantità molto piccola di combustibile nucleare sotto forma di uno strato molto sottile ($\approx 3 \mu\text{m}$) che è bruciato in modo molto efficiente. Viene sfruttata una dinamica speciale dei neutroni per assicurare che anche tale strato ultra-sottile di combustibile sia sufficiente a raggiungere la criticità. Il vuoto ultra-spinto, presente nello spazio, viene sfruttato per evacuare parte degli FF prodotti.

La frazione rimanente degli FF, non dissipata nel gas, è sufficiente ad assicurare la presenza di un numero sufficiente di neutroni ritardati, necessari per il controllo nel caso sia scelta l'opzione di un reattore critico.

La temperatura molto elevata del gas scaricato, una volta trasformata dall'ugello in movimento coerente nella direzione della spinta, produce velocità di scarico v_{sc} e corrispondenti impulsi specifici I_{sp} che sono molto più grandi di quelli di un tipico combustibile chimico o di un motore nucleare NERVA.

BREVE DESCRIZIONE DELLE FIGURE

La Figura 1 è un grafico che rappresenta la frazione dell'energia degli FF che si sprigiona da

un lato di un deposito piatto (lamina) di materiale fissile (^{242}mAm). Il limite asintotico di 0,44 per spessore zero, in cui sono emessi metà degli FF, è metà dell'energia totale erogata agli FF dal processo di fissione.



La Figura 2 rappresenta una configurazione schematica usata per i calcoli. Un riflettore di neutroni cavo 1 con deposito uniforme sottile di materiale fissile 2 circonda un volume 3 riempito con gas a bassa pressione ed in cui gli FF emessi dalla lamina si propagano e alla fine si possono fermare.

La Figura 3 è un grafico che rappresenta il fattore di moltiplicazione k per una geometria semplificata di un singolo strato su un riflettore sferico in funzione dello spessore dello strato del riflettore e del deposito di ^{242}mAm fissile.

La Figura 4 è un grafico che rappresenta il fattore di moltiplicazione k , calcolato nella teoria di diffusione semplice, per differenti elementi fissili e per uno spessore del riflettore di carbonio di 20 cm e 40 cm (densità: $1,9 \text{ g/cm}^3$), in funzione del prodotto [guadagno di area, G_{area}] x [spessore dello strato (mg/cm^2)], semplicemente proporzionale alla quantità totale di combustibile

nella cavità. Le sezioni d'urto sono valutate a 0,15 eV. I risultati per ^{233}U sono molto vicini a quelli per ^{235}U e non sono stati visualizzati per chiarezza.

La Figura 5 è una vista schematica in sezione trasversale di un tubo cavo di piccolo diametro 4 internamente rivestito con un deposito sottile di combustibile 5. Il gas propellente fluisce all'esterno delle pareti attraverso pori o piccoli fori, il flusso è indicato schematicamente dalle piccole frecce 6, ed esce attraverso l'estremità aperta del tubo 7. La pressione del gas nel tubo è mantenuta ad un valore prestabilito dalla contropressione agente su 7 e generata dinamicamente dalla gola dell'ugello.

La Figura 6 è un grafico che rappresenta la dipendenza dei parametri principali di una configurazione a tubi multipli in funzione della dimensione del raggio interno del riflettore ($2R = h$). Si assume che il rapporto di riempimento sia $f = 0,7$.

La Figura 7 è un grafico che rappresenta lo spettro dell'energia cinetica degli FF emessi, mediato sulla composizione nucleare figlia, per differenti spessori del deposito.

La Figura 8 è un grafico che rappresenta la distribuzione delle cariche degli ioni che sopravvivono all'uscita della lamina, mediata sulla composizione nucleare figlia, per differenti spessori del deposito.

La Figura 9 rappresenta le perdite specifiche di energia (MeV per mg/cm^2) per una varietà di ioni da $Z=34$ a $Z=64$ nell'uranio solido e nell'idrogeno gassoso, in funzione dell'energia cinetica in MeV/AMU. Si osservino le perdite molto maggiori per ionizzazione specifica nell'idrogeno a causa della minore velocità degli elettroni orbitali. La carica sopravvivate degli ioni si riduce a velocità inferiori ed è la causa delle minori perdite per ionizzazione a bassa velocità degli ioni, vale a dire l'assenza del picco di Bragg.

La Figura 10 è un grafico che rappresenta la deposizione di energia specifica, nell'idrogeno gassoso mediata sullo spettro degli FF e in tutte le direzioni in funzione della distanza dalla lamina (infinita), per vari spessori del deposito.

La Figura 11 è un grafico che rappresenta la frazione di energia depositata in $1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ($\omega(t)$) dovuta agli FF alla distanza t ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) da una lamina uniforme infinita con un deposito di ^{242}Am ,

spesso 3 mg/cm^2 . È anche rappresentato l'effetto combinato di due di tali lamine prospicienti tra loro ad una distanza di $500 \text{ } \mu\text{g/cm}^2$. Allo scopo di trovare l'effettiva energia depositata in $1 \text{ } \mu\text{g/cm}^3$ di idrogeno, si deve moltiplicare $\omega(t)$ per l'energia emessa da ciascuna lamina per cm^2 .

La Figura 12 è un grafico che rappresenta la densità di potenza dW/dm depositata nel gas secondo un calcolo numerico accoppiato dell'idrodinamica e della propagazione degli FF per la geometria cilindrica della Figura 5 ed una densità totale di potenza nucleare per unità di superficie di 200 Watt/cm^2 . La temperatura finale è limitata dalla radiazione a 9.400 K . Il diametro del tubo è stato fissato a 40 cm e la lunghezza del tubo a 250 cm . Tuttavia, il rapporto dimensioni/pressione è un eccellente fattore di scala allo scopo di estendere il risultato a differenti diametri del tubo. Finché la lunghezza è molto maggiore del diametro del tubo, la distribuzione dell'energia nella parte centrale è uniforme ed indipendente dalla lunghezza del tubo. Sono visualizzate diverse pressioni nell'intervallo $1 \div 30 \text{ bar}$.

La Figura 13 è un grafico che rappresenta la frazione dell'energia degli FF depositata nel gas

dW/dm in funzione della pressione del gas ed in base alle condizioni descritte per la Figura 12. Il fattore di scala è il prodotto [pressione] x [diametro del tubo].

La Figura 14 è un grafico che rappresenta in funzione della pressione del tubo un diametro ottimale del tubo per la geometria della Figura 5 e la deposizione del 90% dell'energia degli FF.

La Figura 15 è un grafico che rappresenta la variazione radiale dall'uniformità della deposizione per unità di massa dell'energia degli FF dW/dm a pressione ottimale (deposizione del 90% dell'energia degli FF nel gas) e per la geometria della Figura 5, in base alle condizioni della Figura 12.

La Figura 16 è un grafico che rappresenta la potenza irradiata residua, integrata rispetto allo spettro, in Watt per $1 \mu g$ di gas radiante in funzione dello spessore del gas attraversato, per varie temperature del gas. Il valore di $5 \mu g/cm^2$ corrisponde a circa 1 cm di gas a 7.000 K ad una pressione di 3 atm.

La Figura 17 è un grafico che rappresenta la distribuzione di massa differenziale dm/dT ($g. K^{-1}$) all'interno del tubo di riscaldamento (Figura 5),



in funzione della temperatura T , con e senza l'effetto delle perdite per radiazioni distanti. La curva con le perdite per radiazioni ha un asintoto a circa $T_{\infty} = 9.500 \text{ K}$, a causa dell'equilibrio tra la potenza di riscaldamento degli FF e la potenza irradiata.

La Figura 18 è un grafico che rappresenta la potenza ottica irradiata all'indietro sulle pareti e la frazione della potenza degli FF irradiata all'indietro sulle pareti in funzione della temperatura finale di ristagno T_{\max} per un motore con i parametri della Figura 12.

La Figura 19 rappresenta la configurazione di base di un motore secondo l'invenzione. Le dimensioni ed il numero dei tubi sono puramente indicativi.

La Figura 20 è una vista in sezione trasversale lungo il piano mediano della Figura 19. Le dimensioni ed il numero dei tubi sono puramente indicativi.

La Figura 21 è uno schema di principio di una parete permeabile del tubo. È rappresentato un piccolo segmento della sezione circolare del tubo 28. Il volume interno 36 del tubo è riempito con gas, mentre il tubo è immerso nel refrigerante 29.

La Figura 22 è un grafico che rappresenta il rapporto delle aree del radiatore e dello strato di produzione del calore in funzione della temperatura del radiatore in °C, per differenti valori della potenza di fissione specifica dello strato. È anche indicato il punto di ebollizione del litio alla pressione atmosferica.

La Figura 23 è una rappresentazione schematica di principio dell'impianto di raffreddamento di un motore, come illustrato nella Figura 19.

La Figura 24 è un grafico che rappresenta la velocità di scarico e l'impulso specifico per un cono di scarico ottimizzato nell'approssimazione 1-D in funzione della temperatura di ristagno. La curva superiore corrisponde all'equilibrio adiabatico con ricombinazione completa, mentre la curva inferiore a quello senza alcuna ricombinazione. La pressione di ristagno è 6 atm.

DESCRIZIONE DEI CONTENUTI RILEVANTI

1.- Riscaldamento dai frammenti di fissione

La ben nota reazione di fissione indotta da neutroni è la fonte dell'energia nucleare preferita a causa della sua elevata resa e la sua capacità di sostenere una reazione a catena basata su neutroni.

In questa reazione, il nucleo iniziale viene scisso in due frammenti di fissione (FF) ed in un certo numero di neutroni (>2) che sono necessari per continuare la reazione a catena. La distribuzione media di energia in una tipica reazione di fissione è tale che una percentuale maggiore -cioè $168 \text{ MeV} / 191 \text{ MeV} = 88\%$ - dell'energia impiegabile (i neutrini sono esclusi) viene prodotta sotto forma di energia cinetica mediante la coppia di FF. Poiché i frammenti del nucleo progenitore sono allontanati nella scissione oltre il campo delle forze nucleari (attrattive), si produce energia per azione della intensa repulsione elettrostatica tra i due frammenti, il resto essendo la diseccitazione dei livelli nucleari con emissione gamma e di neutroni, eventualmente seguita dalla diseccitazione con emissione β .

Gli FF viaggiano per un cammino assai breve nel combustibile fissile, cedendo energia sotto forma di calore nelle immediate vicinanze del nucleo progenitore, con perdite estremamente elevate per ionizzazione specifica a causa delle loro cariche elevate. Poiché il cammino più lungo di ciascuno dei due FF è tipicamente $10 \text{ }\mu\text{m}$ in un combustibile metallico, tale deposizione di energia

fortemente localizzata è in genere non accessibile direttamente e la deposizione elevata di calore specifico degli FF viene diluita dalla conducibilità termica entro la massa del combustibile.

Viene qui descritto, nel quadro di un reattore nucleare a fissione critico (o eventualmente anche sottocritico), un metodo per un'utilizzazione diretta e pratica dell'energia cinetica degli FF emessi da un sottile strato di materiale fissile depositato su una lamina. Questa energia viene dissipata nel mezzo gassoso circostante, per esempio idrogeno o altro gas propellente che viene fortemente riscaldato, tipicamente fino a temperature prossime a 10.000 K.

L'applicazione più diretta di questo metodo è la propulsione a razzo per missioni spaziali. Si intende perciò in generale che il motore venga fatto funzionare nel vuoto interplanetario. Il vuoto ultra-spinto, presente nello spazio, viene usato per evacuare insieme con il gas gli FF usciti dalla lamina. Il resto degli FF rimane generalmente impiantato nella lamina, sebbene con il tempo una frazione aggiuntiva possa inoltre più tardi evaporare e perdersi nello spazio.



A paragone con i motori a propulsione chimica, che funzionano ad elevata spinta per un tempo relativamente breve, questo metodo, come la propulsione ionica, produce una spinta continua ma di bassa intensità, adatta per viaggi lunghi nello spazio profondo. Tuttavia essa è potenzialmente molto più potente della propulsione ionica, poiché si possono produrre facilmente potenze di spinta di molti MWatt. Può essere preso in considerazione un motore su grande scala, appropriato per viaggi interplanetari con uomini a bordo. La struttura del motore, basata su una configurazione a gas molto caldo ed un combustibile freddo, è relativamente semplice, con pochi componenti funzionali; non vi sono grandi parti in movimento veloce ed essa è di funzionamento facile e flessibile.

Tale temperatura elevata viene trasformata dall'ugello in un getto di idrogeno atomico di elevata velocità, cioè un impulso specifico $I_{sp} = 2000$ s, molto maggiore del valore $I_{sp} = 430$ s dei migliori motori chimici. Una velocità finale prefissata del razzo può essere ottenuta con una massa sostanzialmente minore di propellente, che a sua volta prolunga l'estensione potenziale del

viaggio oppure, in alternativa, abbrevia la sua durata.

2.- Ottenimento della criticità

Allo scopo di ottenere l'uscita degli FF dal materiale combustibile, il materiale fissile deve essere sotto forma di un deposito estremamente sottile (qualche mg/cm^2) in forma metallica oppure in forma di composto chimico. Poiché gli FF sono emessi in direzione casuale ed uniformemente lungo lo spessore dello strato, la frazione dell'energia cinetica degli FF che viene trasportata fuori dal deposito è quella mostrata in Figura 1. Nella Figura è illustrata la frazione dell'energia nucleare totale prodotta entro lo strato che sfugge sotto forma di energia cinetica degli FF. È evidente che l'efficienza di estrazione dell'energia è una funzione velocemente decrescente dello spessore dello strato. Spessori dello strato dell'ordine di 1 - 3 mg/cm^2 sono un appropriato compromesso fra lo spessore dello strato ed un buon trasferimento di energia degli FF fuori dal deposito.

Uno spessore di 1 mg/cm^2 corrisponde a circa 1.100 strati atomici di materiale fissile (per

esempio ^{242m}Am) oppure un semplice deposito di 10 g su un metro quadrato. Come si può ottenere la criticità con un materiale fissile così fortemente diluito? Per esempio, con un neutrone (termico) che attraversi in direzione normale tale strato, impiegando l'elemento più favorevole che è ^{242m}Am , il quale ha una sezione d'urto di fissione σ_{fiss} di circa 5300 barn, la probabilità di interazione è soltanto dell'1,31%. Per altri elementi più comuni, come ad esempio ^{235}U , ^{233}U o ^{239}Pu , questa probabilità di interazione è più di un fattore 10 più piccola (si veda la Tabella 1). Sono quindi richiesti molti attraversamenti dello strato fissile da parte dei neutroni. Secondo la presente invenzione ciò è ottenuto con una appropriata configurazione degli strati (sottili) del combustibile all'interno di un riflettore di neutroni molto efficiente.

Tabella 1. Alcune sezioni d'urto a 0,15 eV per-i combustibile più utilizzati

	Cattura (barn)	Fissione (barn)	$\sigma_{catt}/$ ($\sigma_{catt} + \sigma_{fiss}$)	Nucleo figlio	Cattura nucleo figlio (barn)
^{233}U	27,91	215,97	0,11	^{234}U	36,71
^{235}U	34,45	207,51	0,14	^{236}U	2,19
^{239}Pu	310,34	535,24	0,37	^{240}Pu	150,60
^{242m}Am	1098,89	5248,15	0,17	^{243}Am	34,51

Si consideri in primo luogo una configurazione idealizzata di una cavità, in cui si introduce un certo combustibile all'interno di un materiale

spesso che lo circonda ed è capace di riflettere i neutroni. I neutroni si sposteranno con moto a "ping-pong" nella cavità tra le sue pareti riflettenti ed attraverseranno molte volte le lamine sottili caricate di combustibile. I neutroni avranno una maggiore probabilità di fissione. La criticità è assicurata, poiché i neutroni di fissione appena prodotti faranno continuare il processo.

Poiché la probabilità di attenuazione in ciascun attraversamento della cavità è piccola, il flusso entro la cavità sarà approssimativamente uniforme. Perciò la probabilità di interazione per massa unitaria di combustibile sarà indipendente dall'effettiva configurazione spaziale del combustibile entro il dispositivo. Per il calcolo ed in prima approssimazione si può pertanto assumere che (Figura 2) entro il riflettore 1 lo strato 2 di combustibile sia uniformemente distribuito sulle pareti interne della cavità 3. Questa è soltanto una schematizzazione per il calcolo. In realtà la struttura interna sarà generalmente costituita da parecchie unità cilindriche con uno strato fissile sottile depositato sulle pareti interne.



Dopo un veloce processo di rallentamento nel riflettore, l'energia cinetica media dei neutroni (prodotti dalla fissione) si avvicinerà rapidamente all'energia termica alla temperatura del riflettore. Un semplice calcolo basato sulla teoria della diffusione per i neutroni termalizzati mostra che per una configurazione ideale del combustibile, il flusso in presenza del riflettore (infinito) viene potenziato, rispetto a quello senza riflettore, del fattore

$$F = 1/kD = \sqrt{3 \Sigma_{ela} / \Sigma_{catt}}$$

dove Σ_{ela} e Σ_{catt} sono rispettivamente le sezioni d'urto elastiche e di cattura del materiale che diffonde. Alcuni elementi da considerare in prospettiva sono riportati in Tabella 2. Sono stati scelti gli elementi di basso A, poiché essi assicurano una veloce termalizzazione dei neutroni prodotti dalla fissione. La quantità

$$D = \Sigma_{ela}/3$$

è il cosiddetto coefficiente di diffusione, e

$$1/L = k = \sqrt{\Sigma_{catt}/D}$$

è il parametro di diffusione. Si possono anche impiegare composti chimici più complessi contenenti elementi con piccole sezioni di cattura macroscopiche. Si osservi che tali proprietà le ha

l'ossigeno: per esempio, le proprietà del BeO sono molto prossime a quelle del berillio metallico.

Tabella 2. Elenco di alcuni elementi di rilevanza come riflettore

Materiale	Densità (g/cm ³)	$L=1/k$ (cm)	D (cm)	$\sqrt{\langle r^2 \rangle}$ (cm)	$F = \sqrt{3\sigma_x / \sigma_a}$
H liq.	0,07	9,76	0,65	3,98	26,14
D Liq.	0,14	2425,63	12,15	990,26	244,53
⁷ Li	0,534	84,75	7,26	34,60	12,27
Berillio	1,84	31,12	0,44	12,70	73,58
Carbonio	1,90	66,59	0,72	27,19	94,78

Uno spessore di riflettore finito darà un F minore, poiché il flusso nel riflettore diminuisce in modo pressoché esponenziale con lunghezza caratteristica L. Perciò L rappresenta l'unità di riferimento per lo spessore di riflettore richiesto. Concludiamo che Be (BeO) e C rappresentano candidati interessanti; Li è troppo trasparente (D troppo grande) e F troppo piccolo; il deuterio ha un L troppo grande. Con Be (BeO) e C sono possibili fattori di potenziamento molto consistenti.

Il fattore di moltiplicazione k dei neutroni ($k = 1$ per la criticità) in funzione dello strato equivalente singolo di ^{242m}Am e lo spessore del riflettore di carbonio sono stati calcolati con

metodi Monte-Carlo e mostrati in Figura 3. Si dovrebbero aggiungere barre di controllo, inserite nel riflettore allo scopo di controllare la moltiplicazione dei neutroni e mantenerla ad un valore prossimo ad 1 in ogni momento, evitando una veloce prontocriticità come si fa in un ordinario reattore di potenza.

La scelta dell'elemento di combustibile è fortemente correlata con il requisito di criticità. Si riportano nella Tabella 1 alcuni dei parametri di rilievo per possibili candidati come combustibili con l'energia media dei neutroni di 0,15 eV, corrispondenti ad una temperatura del riflettore di 1.500 K.

Come già messo in evidenza, l'effettiva struttura del motore consisterà in una configurazione di più strati, con una superficie ricoperta dal combustibile sostanzialmente maggiore di quella di uno strato singolo sulle pareti interne del riflettore. Il rapporto di queste due aree è definito come il guadagno di area G_{area} della configurazione reale rispetto alla configurazione ad un solo strato. In Figura 4 si rappresenta il fattore di moltiplicazione k , calcolato in teoria di diffusione semplice, per differenti elementi

fissili ed uno spessore di riflettore C di 20 cm e 40 cm (densità: $1,9 \text{ g/cm}^3$), in funzione del prodotto [guadagno di area, G_{area}] x [spessore dello strato (mg/cm^2)] direttamente proporzionale alla quantità totale di combustibile nella cavità. Le sezioni d'urto sono calcolate a 0,15 eV. I risultati per ^{233}U sono molto prossimi a quelli per ^{235}U e non sono stati mostrati per motivi di chiarezza.

Si osservi che $^{242\text{m}}\text{Am}$ è un caso eccezionale, ma è anche possibile portare alla criticità sia ^{239}Pu che ^{235}U (^{233}U). Tuttavia, nel caso di ^{235}U , lo spessore del riflettore deve essere significativamente aumentato. In generale, la scelta di combustibili di minori prestazioni implica un riflettore più massivo per compensare le ridotte prestazioni.

Si riassumono brevemente le proprietà nucleari di $^{242\text{m}}\text{Am}$ ($t_{1/2} = 141$ anni), tenendo presente la probabile destinazione del motore descritto, cioè la propulsione nello spazio. Il principale modo di decadimento (99,95%) è una transizione allo stato fondamentale ^{242}Am ($t_{1/2} = 16,01$ ore) per conversione interna con emissione di un elettrone debole (40,3 keV), il resto essendo decadimento α .



Il nucleo figlio decade per il 17,3% in ^{242}Pu ($t_{1/2} = 3,76 \times 10^5$ anni) e 82,7% in ^{242}Cm ($t_{1/2} = 162,9$ giorni) che a sua volta si trasforma per decadimento α in ^{238}Pu ($t_{1/2} = 87,72$ anni).

La radio-tossicità per ingestione di ^{242m}Am e dei suoi prodotti di decadimento è circa la metà di quella del ^{238}Pu , a parità di masse e durante i primi cento anni. Perciò i rischi ambientali potenziali nell'impiego di uno o l'altro di questi elementi in quantità paragonabili sono piuttosto simili. Quest'ultimo elemento è già ben noto nelle applicazioni spaziali, poiché esso è stato impiegato come fonte di energia, per esempio, nel Voyager, Cassini e in altre missioni.

Un tasso di combustione elevato del combustibile (definito come l'energia visibile totale che può essere prodotta dall'unità di massa di un elemento combustibile) richiede che il rapporto

$$\sigma_{\text{catt}} / (\sigma_{\text{catt}} + \sigma_{\text{fiss}})$$

sia il più piccolo possibile, allo scopo di evitare una produzione esagerata degli elementi figli mediante la reazione $(A, Z) + n \rightarrow (A+1, Z) + \gamma$, che a loro volta possono catturare neutroni. Inoltre, per una data massa fissile, il tasso di combustione

varia anch'esso come

$$\sigma_{\text{catt}} / (\sigma_{\text{catt}} + \sigma_{\text{fiss}})$$

poiché il processo di cattura non produce energia apprezzabile.

È evidente dalla Tabella 1 che mentre ^{235}U e ^{233}U hanno eccellenti caratteristiche nucleari, molto simili a quelle di $^{242\text{m}}\text{Am}$ la sezione di cattura frazionaria di ^{239}Pu è molto maggiore e conduce ad un nucleo figlio con una sezione di cattura grande. Perciò ci si deve attendere un tasso di combustione sostanzialmente inferiore. In considerazione della bassa radio-tossicità e delle eccellenti proprietà di fissione, ^{235}U è anche un sostituto potenziale per $^{242\text{m}}\text{Am}$, sebbene possa richiedere un riflettore più pesante.

L'effettiva configurazione del riflettore deve essere calcolata per ciascun caso specifico. Tuttavia, non vi è dubbio che con il metodo indicato si possano trovare configurazioni, nelle quali un tale strato sottile di combustibile può condurre alla criticità.

3.- La disposizione generale della regione di

riscaldamento

Una ottimizzazione dell'impiego dello spazio

entro la cavità del moderatore suggerisce un numero molto grande di tubi cavi di piccolo diametro con un rivestimento interno di materiale fissile, schematicamente mostrato in Figura 5. Ciascun tubo cilindrico 4 è internamente rivestito con un sottile deposito 5 di combustibile. Come sarà meglio illustrato più avanti, il gas propellente fluisce dalle pareti attraverso pori o piccoli fori, con il flusso schematicamente indicato dalle freccette 6, e quindi esce passando attraverso l'estremità aperta del tubo 7. La pressione del gas è mantenuta nel tubo ad un valore prefissato dalla contropressione che agisce su 7 e che è generata dinamicamente dalla gola dell'ugello, cioè la piccola apertura attraverso cui il gas è scaricato nello spazio.

Assumiamo quindi, per scopi illustrativi, una geometria cilindrica in cui il volume entro il riflettore cavo è riempito con una schiera compatta di molti di questi tubi di piccolo diametro e una frazione di riempimento $f < 1$, definita come la

frazione del volume occupato dai tubi. Il rapporto delle superfici del cilindro singolo e del gruppo di n cilindri all'interno è all'incirca

$$G_{area} = (\text{superficie a molti tubi } (n)) / (\text{superficie a$$

tubo singolo) $\approx \sqrt{nf}$

Questi elementi tubolari sono in un certo modo l'analogo delle barre di combustibile in un reattore ordinario. Non vi è alcun motivo per cui n non debba essere veramente grande, sempre che la struttura meccanica di ciascun tubo sia mantenuta semplice. Proprio come nel caso di un reattore, un fluido di raffreddamento può essere fatto circolare tra questi tubi. Seguendo questa analogia, il raffreddamento delle barre può essere effettuato o con un liquido o con un gas. Tuttavia, il raffreddamento con un gas, perché sia efficiente, richiede pressioni elevate e grandi volumi in circolazione. Perciò è preferibile un refrigerante liquido, eventualmente in regime di ebollizione "bifase". In considerazione dell'elevata temperatura richiesta per dissipare il calore nello spazio, la scelta preferibile è quella di un metallo fuso leggero, per esempio litio (${}^7\text{Li}$), già usato nelle applicazioni spaziali nucleari e che ha le eccellenti proprietà neutroniche illustrate nella Tabella 2.

Una stima di primo ordine della configurazione a tubi multipli può essere basata sulla seguente geometria schematizzata:



3.1) Assumiamo che il riflettore abbia un volume cilindrico interno con altezza h uguale al diametro ($h = 2R$); questa configurazione assicura un contenimento ottimale dei neutroni, poiché rende massimo il rapporto volume/superficie interna.

3.2) L'interno del volume è riempito con una schiera compatta di n tubi con $f = 0,7$. I tubi hanno altezza uguale a h ed un raggio r . È facile mostrare che $n \approx fR^2/r^2$.

In Figura 6 si illustra la variazione dei parametri principali in funzione della dimensione interna R del riflettore. Per chiarezza si è fissato il diametro del tubo ad un valore realistico, $2r = 10$ cm. Il numero risultante di tubi è piuttosto grande; da $n = 100$ per $R = 60$ cm essi crescono fino a $n = 400$ per $R = 120$ cm, con una dipendenza R^2 . La superficie dello strato di combustibile va da 38 m^2 per $R = 60$ fino a 304 m^2 per $R = 120$ cm con una dipendenza $R^2h \propto R^3$. In modo simile, è ovviamente da aspettarsi una veloce dipendenza per la massa del combustibile e conseguentemente il numero di giorni di combustione ad una data potenza erogata.

Particolarmente significativo è il fattore di moltiplicazione superficiale, che cresce

linearmente con R raggiungendo i valori $G_{area} = 8,4$ e $G_{area} = 16,8$ per i due valori indicati di R.

Alcuni elenchi di parametri sono dati nella Tabella

3.

Tabella 3. Tipiche disposizioni multitubo

	A	B	C	
Raggio della cavità	100,0	125,0	150,0	cm
Lunghezza dei tubi	200,0	250,0	300,0	cm
Raggio dei tubi	5,0	5,0	5,0	cm
Pressione del gas	15,0	15,0	15,0	bar
Numero di tubi	280,0	438,0	630,0	
Strato superficiale di combustibile	175,9	343,6	593,8	m ²
Guadagno di area sui singoli tubi	14,0	17,5	21,0	
Massa di combustibile a 1 mg/cm ²	1,8	3,4	5,9	kg
Massa di combustibile a 3 mg/cm ²	5,3	10,3	17,8	kg
Energia liberata a 3 mg/cm ²	2638,9	5154,2	8906,4	MW x giorno
Durata del combustibile a 100 MWatt	26,4	51,5	89,1	giorni

Questo elevato valore di guadagno di area G_{area} rispetto al caso di strato singolo, tipicamente pari ad un ordine di grandezza, può essere sfruttato in tre modi diversi:

3.3) Per ridurre lo spessore dello strato di combustibile e per migliorare corrispondentemente l'efficienza di estrazione degli FF. Per esempio, la frazione dell'energia estratta dalla lamina dagli FF cresce dal 23,8% a 3 mg/cm² fino al 33,9%

ad 1 mg/cm² e fino al 44% per una lamina di spessore quasi nullo.

3.4) Per aumentare la quantità di materiale fissile per un dato spessore della lamina e per

estendere la durata di combustione tra le ricariche di combustibile.

3.5) Per permettere l'impiego di combustibili meno facilmente fissionabili, come per esempio ^{235}U , ^{233}U oppure ^{239}Pu .

Una scelta più precisa dei requisiti specifici di questi parametri ovviamente dipende dalla missione da effettuare.

La configurazione di combustibile necessaria per sfruttare efficientemente l'energia cinetica degli FF è piuttosto non convenzionale ed è necessario discuterla in maggior dettaglio per alcune questioni di rilievo. Ci concentreremo su ^{242}mAm . Si ricordi che il "secondo migliore" dal punto di vista della moltiplicazione dei neutroni sarebbe il Pu^{239} . Potrebbero essere usati anche ^{233}U o ^{235}U con un appropriato aumento delle prestazioni del riflettore e con più elevati guadagni di area G_{area} . Considerazioni simili si applicano a tutti questi elementi.

La forma chimica del deposito richiede una speciale attenzione allo scopo di assicurarne il più lungo tempo di durata. Gli effetti principali di rilievo sullo strato sono la presenza (1) del gas da riscaldare e (2) del danno da radiazione

dovuto ai neutroni ed agli FF. La considerazione (1) dipende naturalmente dal tipo di gas che si desidera riscaldare. Si consideri innanzitutto il caso in cui il gas propellente da riscaldare sia idrogeno, di eccellenti prestazioni nei razzi:

3.6) Il carburo di Americio Am_2C_3 si è rivelato molto più resiliente in presenza di idrogeno e lo si raccomanda per l'applicazione con questo gas fino a temperature superiori a 1.500°C .

3.7) Particolarmente interessanti sono i composti terziari, come ad esempio il carburo di U-Zr-Nb che è stato già impiegato nel reattore a gas con propulsione nucleare del programma NERVA-NASA. Il carburo di U-Zr-Nb ha funzionato nel programma NERVA senza apprezzabile danno per parecchie ore in una atmosfera di idrogeno caldo (3.000 K) ad alta pressione (150 bar). Sebbene il nostro sia uno strato sottile invece di un materiale voluminoso, questa tecnologia appare sicura specialmente se si prende in considerazione il fatto che, nelle nostre condizioni, temperatura e pressione hanno valori molto meno estremi. La sostituzione dell'Uranio con Americio (carburo di Am-Zr-Nb) o eventualmente con Plutonio (carburo di Pu-Zr-Nb) non dovrebbe presentare particolari problemi, portando a



composti con proprietà molto simili a quelle del carburo di U-Zr-Nb.

L'uso di altri gas può variare i requisiti sulla composizione chimica dello strato. Per esempio, oltre ai due composti 3.6) e 3.7), possono essere usati anche altri composti nel caso di un gas nobile inerte, come elio, argo, ecc.:

3.8) Un deposito metallico di Americio puro: densità $13,67 \text{ g/cm}^3$, punto di fusione di 1.176°C e punto di ebollizione di 2.011°C . Questa forma chimica non è adatta alla presenza di idrogeno gassoso a causa della possibile formazione di un composto a base di un idruro del tipo AmH_2 e AmH_3 . Si osservi che l'Am metallico potrebbe anche essere sotto forma di uno strato "umido" (liquido) sottile ad alta temperatura.

3.9) L'ossido di Americio AmO_2 è il più stabile degli ossidi e con elevato punto di fusione. Ma in presenza di idrogeno caldo (fortemente riducente) esso ha probabilità di decomporsi nel metallo e perciò, come nel punto

3.8), è adatto soltanto a riscaldare gas non riducenti.

Chiaramente la scelta di una appropriata composizione chimica dello strato richiede la

considerazione attenta del comportamento chimico in presenza di ogni gas specifico, sia esso idrogeno, elio o altri gas.

Il danno da radiazione è un secondo, importante elemento che deve essere studiato con cura poiché, come la stabilità chimica dello strato, esso può limitare il grado di utilizzo del combustibile ottenibile.

3.10) Il flusso neutronico integrato all'interno del moderatore corrispondente a 1/e del combustibile trasmutato è

$$\int \Phi dt = 1/(\sigma_{cat} + \sigma_{fiss})$$

$$= 10^{21}/(1,099 + 5,248) = 1,57 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2 \text{ (}^{242}\text{mAm)},$$

cioè molto piccolo a causa della grande sezione di assorbimento del combustibile fissile. In aggiunta, lo spettro si presenta fortemente piccato intorno alle energie termiche, il che riduce ulteriormente il danno da radiazione. Questo flusso neutronico integrato è di diversi ordini di grandezza minore di quello tipico per il combustibile spento di un reattore ordinario.

Perciò non vi sono seri problemi, né nelle parti del motore né nel riflettore, anche dopo molte ricariche di combustibile.

3.11) Un problema tecnico potenziale è in

relazione alla stabilità dello strato di ^{242}mAm sotto la forte ionizzazione degli FF localmente prodotti. Il danno, dovuto alla radiazione, dello strato di ^{242}mAm è stato stimato essere dell'ordine di grandezza approssimato di 30 d.p.a. (dislocazioni per atomo) sul massimo tasso di combustione prevedibile, corrispondente alla metà del combustibile fissionato. Finestre per fasci esposte a fasci di particelle cariche, come è appunto il caso per il contributo dominante dovuto agli FF, non mostrano seri danni dopo tale dose di esposizione. Poiché lo strato esposto alla fissione non ha una funzione strutturale indipendente, il danno da radiazione di per sé non dovrebbe essere un problema. Le cose stanno così specialmente se una temperatura convenientemente elevata provoca la ricottura di parte dei difetti. I combustibili metallici ordinari ed a base di ossidi nei reattori veloci autofertilizzanti sono stati con successo esposti ad un tasso di combustione di circa la metà del valore considerato nelle nostre applicazioni. Si osservi che nel caso di reattori veloci deve essere aggiunto il danno da radiazione dovuto ai neutroni veloci, per i quali il danno da radiazione è di gran lunga superiore

che nel nostro caso.

3.12) Un'altra possibile causa di perdita di parte dello strato di ^{242}mAm può essere una emissione diretta (dispersione per espulsione) dallo strato. Tuttavia, per il tasso di combustione indicato, il flusso totale degli ioni che si allontanano è $\Phi \approx 1,21 \times 10^{18}$ a/cm² e la frazione emessa per una sezione d'urto $\sigma_{ej, q=0}$ è $dn/n = \Phi \sigma_{ej, q=0} / 2 = 0,6 \times 10^{18} \sigma_{ej, q=0}$, dove il fattore $\frac{1}{2}$ prende in considerazione il fatto che la sorgente di ioni che si allontanano è uniformemente distribuita entro lo strato. Per $dn/n \leq 0,1$ si ha $\sigma_{ej, q=0} \leq 1,64 \times 10^{-19}$ cm² che è un valore limite superiore conservativo.

3.13) Una frazione sostanziale (50%) degli FF penetra dallo strato nella lamina di supporto e rimane ivi impiantata. Questa situazione non è differente da quella delle guaine del combustibile di un reattore ordinario, in cui gli FF emessi dal bordo del combustibile urtano sulla parete della guaina. Come in quel caso, non ci si aspetta nessun serio problema.

Si dovrebbe evidenziare che la sopravvivenza dello strato, per un periodo tale da permettere il raggiungimento del tasso di combustione del



combustibile previsto, che è un punto importante poiché il motore deve funzionare con il minimo quantitativo iniziale di combustibile, dipende fortemente da un accurato procedimento di produzione che tenga conto degli effetti sopra menzionati.

È interessante esaminare l'evoluzione della composizione isotopica dello strato del combustibile durante una prolungata combustione nucleare. La potenza specifica prodotta viene data in termini di MWatt/kg di combustibile iniziale. Si assume che tale potenza sia erogata in modo costante entro un certo periodo di tempo (giorni). L'energia specifica totale (tasso di combustione), che può essere estratta dal combustibile, può essere pertanto espressa in termini di MWatt/kg x giorno. La completa trasformazione nucleare di 1 kg di ^{242}Am - con circa il 90% fissionato e il 10% trasmutato in ^{243}Am (sterile) - produce circa 840 MWatt x giorno, equivalente a $7,26 \times 10^{13}$ Joule, all'incirca equivalente al contenuto energetico di 1000 tonnellate del miglior combustibile chimico ($\text{O}_2 + \text{H}_2$ liquidi).

Ci si può aspettare di raggiungere realisticamente un tasso di combustione che è circa

la metà di questo limite teorico. Questo significa che circa la metà del ^{242}mAm sarà realmente bruciata, assumendo naturalmente che lo strato sottile non sia altrimenti danneggiato o allontanato per evaporazione durante la combustione.

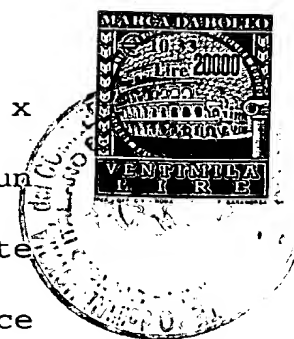
L'evoluzione temporale della composizione isotopica del combustibile a causa della combustione nucleare è stata simulata con un programma Monte-Carlo completo. Il programma utilizza una geometria realistica con il combustibile costituito da ^{242}mAm , consumato con una erogazione costante di potenza. È stata simulata l'evoluzione temporale della composizione del combustibile, con l'inclusione del decadimento di tutti gli elementi ed in particolare degli FF. Nella stima del fattore di moltiplicazione k , sono stati presi in considerazione gli effetti di tutte le reazioni secondarie. L'accumulo degli FF entro il motore, mano a mano che il tempo passa, introduce una fonte aggiuntiva di catture e perciò una riduzione del fattore di moltiplicazione. Si assume che gli FF rimangano tutti entro il motore e che perciò contribuiscano completamente alle catture dei neutroni. Questo è conservativo,

poiché in realtà circa il 20 ÷ 30% degli FF vengono immediatamente espulsi con il gas. Alcuni dei restanti FF possono uscire dallo strato sottile per diffusione ed essere progressivamente perduti nello spazio miscelati con il propellente. Per inciso, la ritenzione a breve termine (pochi minuti) entro il motore di una frazione significativa degli FF (70 ÷ 80%) è utile per disporre di un numero di neutroni "ritardati" sufficiente ad assicurare il controllo della criticità, come nel caso di un reattore ordinario.

Il bruciamento del combustibile si arresta quando il valore di k diminuisce al di sotto di 1. Il fattore di moltiplicazione k , in assenza delle barre di controllo, dopo una prima, quasi immediata diminuzione dovuta a catture negli FF dello Xeno, diminuisce lentamente con il tasso di combustione, raggiungendo il limite del regime di criticità dopo circa 500 MWatt x giorno/kg. Il maggior contributo alla diminuzione è rappresentato alla riduzione di massa del combustibile dovuta alla fissione ed alla cattura. Evidentemente, è necessaria a questo punto la ricarica del combustibile.

La frazione dei neutroni catturati dagli FF accumulati ammonta soltanto a circa il 10% del

consumo massimo di combustibile di 500 MWatt x giorno/kg. Questa frazione è costituito da un contributo costante di xeno, che viene rapidamente trasmutato, da un contributo invece progressivamente crescente proveniente dalla parte restante degli FF. Come già messo in evidenza, questo valore deve essere considerato come un limite superiore conservativo della perdita reale di neutroni dovuta all'accumulo degli FF nel motore, poiché lo Xeno ed altri elementi hanno maggiore probabilità di essere rapidamente diffusi nello spazio.



4.- Tecnica di riscaldamento

4.1- Il processo di riscaldamento mediante FF

Il tipico spettro dell'energia cinetica in MeV degli FF che emergono dalla lamina è rappresentato in Figura 7. Gli FF trattengono una frazione sostanziale dei loro elettroni atomici, e così la loro carica non è uguale a Z. La distribuzione di carica sopravvissuta all'uscita della lamina è mostrata in Figura 8.

Noi siamo interessati alle perdite energetiche nel gas che si allontana dallo strato, inizialmente

alla temperatura dello strato e che viene progressivamente riscaldato a temperature elevate allontanandosi dalla lamina. Le perdite per ionizzazione specifica, nel gas a basso valore di Z ($\text{MeV}/(\mu\text{g}/\text{cm}^2)$) sono fortunatamente molto maggiori (tipicamente 20 volte) di quelle nello strato fissile ad elevato Z (Figura 9). Le perdite energetiche sono ridotte nello strato, poiché la velocità degli FF è generalmente minore di quella degli elettroni interni dello strato ad elevato Z . Così uno spessore molto minore di gas è sufficiente ad estrarre la massima parte dell'energia degli FF.

La differenza è ulteriormente potenziata quando il gas, sotto l'effetto della elevata temperatura, sta per essere ionizzato, poiché le perdite energetiche sono ulteriormente potenziate in un mare di elettroni liberi. Questa è una fortunata circostanza, poiché nel caso di un gas molto caldo, il riscaldamento con FF deve competere con le perdite per energia radiante, che sottraggono energia localmente al gas.

Evidentemente, il processo di riscaldamento si arresterà quando c'è equilibrio tra questi due processi. L'integrazione sulla distribuzione della sorgente nella lamina, la distribuzione angolare

degli FF ed il loro spettro di massa conducono alla curva di efficienza della Figura 1, in cui viene data nel caso del ^{242}mAm la frazione dell'energia totale erogata dalla fissione in uscita dalla lamina sotto forma di FF energetici. Si ottengono curve molto simili per gli altri potenziali combustibili sopra indicati.

Si procede ora ad una discussione specifica del processo di riscaldamento del gas mediante gli FF emessi dallo strato. Si inizi considerando un modello unidimensionale di una lamina piana sottile infinitamente estesa, con energia di fissione specifica per superficie unitaria uniforme emessa dalla lamina $d^2P/dxdy = A$, seguito da un semispazio riempito di idrogeno. Questo modello assai semplice permette di chiarire la caratteristica principale del processo. Calcoli più elaborati, che prendono in considerazione la esatta geometria del motore, verranno presentati nel seguito.

La densità del gas dipende a sua volta fortemente dalla temperatura e così pure la potenza erogata sull'intero volume. Allo scopo di eliminare tale dipendenza dalla temperatura, è preferibile considerare come variabile lo spessore

di gas attraversato in mg/cm^2 . Finché la temperatura del gas sta al di sotto della soglia di ionizzazione, le perdite di energia di ionizzazione specifica sono strettamente proporzionali alla densità.

Più precisamente, nelle condizioni stazionarie di una lamina infinita, la deposizione di energia specifica (definita come energia per unità di massa e di tempo, oppure equivalentemente come potenza per unità di massa) degli FF emessi dalla lamina per unità di massa di gas dW/dm , è funzione della distanza dalla lamina z e della pressione gassosa (uniforme) p_0 . Perciò la dipendenza dalla temperatura della densità $\rho(z)$ del gas può essere rimossa, con una sostituzione di variabile in cui la coordinata di "spessore"

$$t(z) = \int_{z'=0}^{z'=z} \rho(z') dz$$

viene impiegata invece di z , dove ρ è la densità locale. Noi siamo interessati a $dW/dm = \Lambda \omega(t)$, la deposizione locale di potenza per unità di massa di gas. Evidentemente $\int \omega(t) dt = 1$, poiché

l'integrazione di dW/dm sulla variabile $t(z)$ fornisce la densità di potenza emessa dall'area unitaria Λ . La funzione $\omega(t)$ calcolata con un metodo Monte-Carlo viene mostrata in Figura 10 per

un certo numero di differenti spessori della lamina. Il risultato indica una funzione $\omega(t)$ che diminuisce uniformemente con t (cioè la più elevata deposizione di energia specifica si verifica in posizione vicino alla lamina) e che si estende fino ad un intervallo massimo di circa $500 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ che corrispondono a 3×10^{20} atomi/ cm^2 . La massima parte dell'energia è depositata entro circa $1,5 \times 10^{20}$ atomi/ cm^2 .

La deposizione di energia diventa considerevolmente più uniforme se il gas è contenuto nello spazio compreso tra due di tali lamine poste l'una rispetto all'altra ad uno spessore di gas dell'ordine di $500 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ (il valore di separazione può essere fissato in una data geometria del motore per esempio regolando la pressione operativa). La somma

$$dW/dm = \Lambda[\omega(t) + \omega(500 \text{ g}/\text{cm}^2 - t)]$$

mostra una distribuzione relativamente piatta (Figura 11).

Una analisi corretta del processo di riscaldamento richiede un calcolo numerico che accoppi idrodinamica e propagazione degli FF, che è stato effettuato con la geometria della Figura 5 ed una temperatura finale di 9.400 K (limitata



dall'irraggiamento termico, si veda più oltre). Il diametro del tubo è stato posto pari a 40 cm e la lunghezza del tubo a 250 cm. Tuttavia il rapporto dimensione/pressione è un eccellente fattore di scala allo scopo di estendere il risultato a differenti diametri del tubo. Finché la lunghezza è molto maggiore del diametro del tubo, la distribuzione di energia nella parte centrale è uniforme ed indipendente dalla lunghezza del tubo. La densità di potenza emessa dall'area unitaria è stata fissata al valore di $\Lambda = 200 \text{ Watt/cm}^2$. Noi notiamo che anche per tale valore di Λ relativamente modesto, la deposizione di energia specifica $dW/dm = 10^6 \text{ Watt/g}$ nel gas è invero molto grande. La distribuzione risultante (Figura 12) mostra che dW/dm è relativamente uniforme, come viene previsto dal modello unidimensionale, sempre che la pressione sia regolata per combinare opportunamente distanza di penetrazione degli FF e diametro del tubo. Per pressioni molto minori di quella ottimale, una frazione significativa degli FF urta ancora le pareti del tubo. Per pressioni molto maggiori, gli FF si arrestano prima di raggiungere la parte centrale del gas.

La frazione di energia degli FF depositata

entro il gas come funzione della pressione del gas è rappresentata in Figura 13. Si osservi l'uso del fattore di scala [diametro del tubo] x [pressione]. Il diametro ottimale del tubo è stato fissato alquanto arbitrariamente per il 90% dell'energia degli FF depositata nel gas ed è rappresentato in Figura 14 come funzione della pressione nel tubo. La distribuzione della potenza riscaldante risultante è molto piatta entro circa $\pm 12\%$, come è mostrato in Figura 15.

Per concludere, per una densità della potenza nucleare relativamente modesta della lamina di $\Lambda = 200 \text{ W/cm}^2$, la potenza specifica mediata sul volume, erogata al gas è $dW/dm = 0,661 \text{ MWatt/g}$, invero molto grande.

Potenze di riscaldamento dell'ordine del Megawatt per ciascun grammo di gas sono perciò realizzabili con un riscaldamento accettabilmente basso della superficie della lamina. Evidentemente vi è una proporzionalità diretta tra l'emissione superficiale della potenza dalla lamina e la quasi costante deposizione di energia massiva specifica nel gas. Come vedremo nel seguito, poiché il tempo di permanenza del gas nel tubo è relativamente lungo (parecchi secondi), è possibile raggiungere

la richiesta temperatura del gas con una densità di potenza della superficie della lamina tipicamente nell'intervallo tra 20 e 200 Watt/cm², che è molto minore del limite tecnico dovuto al raffreddamento.

4.2- Perdite per irraggiamento

Il gas caldo emette energia radiante, che può essere o riassorbita dal gas circostante o dissipata sulle pareti del motore. Ci si può attendere che tali effetti relativi alle radiazioni siano una funzione rapidamente crescente della temperatura del gas e giochino un ruolo importante nel funzionamento del motore. In effetti, la temperatura massima che il processo di riscaldamento con gli FF può raggiungere è limitata dalla condizione di equilibrio tra la potenza specifica introdotta dagli FF e la potenza irradiata nei domini di frequenza nei quali il gas è otticamente "sottile". Perciò questi effetti determinano la resa finale del metodo.

È una fortunata circostanza il fatto che le equazioni fondamentali per gli atomi di idrogeno e gli elettroni liberi siano ben note teoricamente. L'idrogeno molecolare persiste soltanto fino a temperature che sono abbastanza minori di quelle di

rilievo per perdite radiative significative. Perciò esiste un solido fondamento teorico, almeno nel caso in cui l'idrogeno è l'elemento propellente. Noi ci limiteremo ad un sommario dei risultati. Tutte le transizioni, cioè legato-legato, legato-continuo e continuo-continuo sono state incluse.

La potenza residua portata dalla radiazione dopo l'attraversamento di uno spessore L di gas (in $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) è rappresentata in Figura 16. Lo spettro mostra un picco nel visibile, con una sostanziale coda nell'infrarosso.

Si osserva una veloce diminuzione della potenza residua con lo spessore attraversato nella regione corrispondente ad una frazione di centimetro di gas. Una frazione sostanziale della potenza irradiata è chiaramente riassorbita nelle vicinanze del punto di emissione, per inciso dove la temperatura del gas è molto prossima a quella dell'elemento irradiante. Questo contributo può essere sicuramente trascurato, poiché esso contribuisce ad un apparente aumento della conducibilità termica. --Dopo questa rapida diminuzione, si può osservare un andamento piano relativamente lungo, corrispondente ad una



radiazione alla quale il gas è essenzialmente trasparente. Questa radiazione normalmente sfugge dal volume riscaldante ed urta le pareti del motore, dove essa può essere assorbita oppure diffusa/riflessa entro il volume del gas.

Come chiaramente mostrato dalla Figura 16, la maggior parte della radiazione emessa, almeno fino a 12.000 K, si raggruppa nettamente in due distinte regioni spettrali:

4.2.1) una regione nella quale la radiazione viene sicuramente assorbita molto prima dello spessore indicativo di $5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, (corrispondente ad 1 cm di gas, a 3 bar e 7.000 K) causando un trasferimento termico a breve raggio e

4.2.2) un'altra regione per la quale il gas è essenzialmente trasparente fino a percorsi che superano la dimensione del volume di gas, causando una perdita termica sulle pareti (radiazione lontana).

Sia la radiazione lontana che il processo di riscaldamento mediante gli FF sono direttamente

proporzionali alla massa di idrogeno, ma la prima al contrario della seconda, cresce molto rapidamente con la temperatura del gas. Perciò vi sarà una temperatura limite, alla quale la potenza

specifica asportata dalla radiazione lontana diventa uguale a quella introdotta dagli FF. La temperatura del gas sarà satura a questo valore.

Si assume (1) che il riscaldamento con gli FF fornisca una potenza costante W_{FF} per unità di massa, indipendente da temperatura e posizione, e (2) che la radiazione emessa dal gas rinnova una potenza $W_{RR}(T)$ per unità di massa, che a sua volta può essere calcolata numericamente dalla potenza irradiata, per la quale il gas è trasparente (vedi 4.2.2). Dopo il tempo dt , una particella di gas che viaggi attraverso il motore lungo il proprio tubo di flusso acquisirà una entalpia specifica per unità di massa

$$dE = (W_{FF} - W_{RR}(T))dt$$

D'altra parte, il flusso massico attraverso il motore si conserva e, in condizioni di regime stazionario per una data temperatura, è dato da

$$dm/dt = \Phi = \text{costante}$$

cioè uguale al flusso massico macroscopico Φ (g/s) attraverso il motore.

La variazione di entalpia è correlata con la variazione di temperatura, per mezzo del coefficiente costituito dal calore specifico (a pressione costante)

$$dE = c_p dT.$$

Combinando le equazioni di cui sopra, possiamo derivare la dipendenza del processo di riscaldamento per un dato volume elementare di gas che procede lungo una linea di flusso:

$$dt = \frac{c_p(T)}{W_{FF} - W_{RR}(T)} dT$$

Mediante integrazione, questa equazione può essere usata per calcolare il tempo di permanenza del gas entro il motore. In presenza di perdite di irraggiamento, che crescono molto rapidamente con la temperatura del gas, si raggiunge una temperatura massima T_∞ (dopo un tempo infinito) come equilibrio tra il calore prodotto dagli FF e le perdite di irraggiamento, che corrisponde alla condizione $dT/dt = 0$ oppure $W_{RR}(T_\infty) = W_{FF}$.

La distribuzione della massa del gas dentro il motore in funzione della temperatura $T < T_{\max}$ è data da

$$\frac{dm}{dT} = \frac{dm}{dt} \frac{dt}{dT} = \Phi \frac{c_p(T)}{W_{FF} - W_{RR}(T)}$$

Una distribuzione tipica di temperatura è rappresentata in Figura 17, con e senza il termine $W_{RR}(T)$. Si noti il rapido stabilirsi delle perdite di irraggiamento e la temperatura massima asintotica per $T_\infty = 9.500$ K. La massa totale di gas entro il motore viene facilmente calcolata

mediante integrazione della curva in Figura 17.

Integrando la potenza specifica W_{RR} sulla intera distribuzione di massa in funzione della temperatura, si trova la potenza irradiata totale che termina sulle pareti per una data temperatura finale T_{max} :

$$P_{rad, parete}(T_{max}) = \int_{T_1}^{T_{max}} W_{RR}(T) \left(\frac{dm}{dT} \right) dT = \Phi \int_{T_1}^{T_{max}} \frac{c_p(T)}{W_{FF} / W_{RR}(T) - 1} dT$$

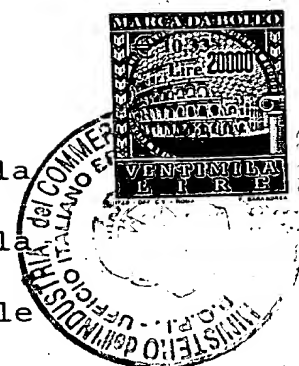
La potenza totale che ritorna sulle pareti è rappresentata in Figura 18 in funzione della temperatura finale. Per temperature di valore non troppo estremo, la frazione

$$\eta_{rad} = P_{rad, parete}(T_{max}) / P_{FF}$$

riassorbita dalle pareti è modesta, per esempio $\eta_{rad} = 0,0342$ ad un valore di $T_{max} = 9.300 \text{ } ^\circ K$ e $\eta_{rad} = 0,576$ a $T_{max} = 9.400 \text{ K}$. La potenza effettiva degli FF deve essere leggermente modificata per tenere conto di queste perdite.

Questi effetti sono stati accuratamente tenuti in conto nel calcolo Monte-Carlo delle prestazioni del processo di riscaldamento. I calcoli idrodinamici completi confermano queste conclusioni.

5.- Criteri di progetto di un motore per propulsione spaziale



5.1- Descrizione funzionale

Una struttura tipica si basa su un numero relativamente grande di tubi cilindrici cavi e sottili, aperti ad una estremità per permettere al gas di sfuggire verso una regione di ristagno. Ciascun tubo (Figura 5) è rivestito con uno strato sottile fissile. Un debole flusso di gas (dell'ordine di 1 g/s/m^2) sfugge uniformemente dalle pareti del tubo verso la sua parte interna, o attraverso (i) fori capillari, (ii) porosità oppure (iii) qualche altro sistema equivalente. Esso si muove allontanandosi lentamente dalle pareti, convergendo alla estremità di uscita, sotto la progressiva azione riscaldante degli FF. Gli FF sono prodotti mediante uno strato sottile (tipicamente $3 \text{ } \mu\text{g/cm}^2$) di un adeguato composto chimico di un elemento altamente fissile (tipicamente ^{242}mAm), che assicura la criticità nucleare grazie alle proprietà altamente riflettenti del riflettore. La densità di potenza superficiale dovuta alla fissione prodotta sulla parete interna del tubo è nell'intervallo di $\Lambda = 20 + 200 \text{ Watt/cm}^2$ corrispondente -in condizioni appropriate- ad una potenza di riscaldamento

specifica degli FF per il gas dell'ordine $dW/dm = 0,5 \times 10^5 \div 10^6$ W/g. Una frazione significativa della potenza di fissione (tipicamente 70%, dipendente principalmente dalla geometria e dalla pressione del gas) deve essere asportata mediante raffreddamento delle facce esterne del tubo mentre la parte restante viene usata per il riscaldamento del gas. Per questo scopo, un refrigerante adeguato è in buon contatto termico con le superfici esterne dei tubi, in analogia a quanto si fa per le barre di combustibile di un reattore ordinario.

I tubi sono raffreddati dall'esterno. Il raffreddamento dovrebbe essere progettato conservativamente in modo tale da poter asportare la totalità del calore nucleare, poiché se per esempio l'idrogeno gassoso dovesse improvvisamente mancare, l'energia totale proveniente dalla reazione di fissione deve essere assorbita dalla parete. La faccia esterna della parete di supporto potrebbe essere raffreddata, per esempio, usando

Litio liquido (punto di fusione 180°C , punto di ebollizione 1.342°C), una tecnologia che viene impiegata in applicazioni spaziali. Deve essere impiegato ^7Li isotopicamente puro, poiché ^6Li ha una

sezione di cattura per i neutroni troppo grande. D'altra parte, ${}^7\text{Li}$ ha eccellenti proprietà neutroniche, come viene illustrato in Tabella 2. La densità del Litio liquido è di $0,534 \text{ g/cm}^3$. ${}^7\text{Li}$ isotopicamente separato è reperibile in commercio ad un prezzo relativamente basso. ${}^7\text{Li}$ non ha una apprezzabile sezione di cattura per i neutroni e può essere impiegato in quantità senza controindicazioni. Pertanto, la temperatura tipica per la parete esterna può essere nelle vicinanze di 1.300°C . La temperatura dello strato fissile è leggermente superiore, a causa della caduta di temperatura dovuta alla conducibilità termica attraverso la parete del tubo. Questa differenza di temperatura è di solito non superiore a poche centinaia di gradi $^\circ\text{C}$ per le densità di potenza sopra indicate.

Quasi ogni gas -o, più generalmente, ogni composto che sia gassoso alla temperatura e pressione della camera di ingresso- potrebbe essere riscaldato in questo modo. L'uso diretto degli FF per riscaldare un gas a distanza dalle pareti non è condizionato dalle limitazioni di energia e dei materiali imposte ai motori chimici o derivati da reattori a gas. Il nostro approccio è basato su un

gas finale molto caldo che si allontana da pareti relativamente fredde, che emettono FF.

Ci si concentra qui sul caso dell'idrogeno poiché esso è il propellente più adatto per le applicazioni spaziali. L'idrogeno gassoso caldo, alla pressione di alcune bar, raggiunge al ristagno una temperatura dell'ordine di 9.500 K, equilibrio tra alimentazione di calore da parte degli FF e perdite di calore per effetto della radiazione cui il gas è trasparente, ed è scaricato nello spazio attraverso l'ugello ed un cono di espansione. La temperatura molto elevata del gas scaricato, una volta trasformata dall'ugello in moto coerente nella direzione della spinta, produce velocità di scarico v_{sc} che sono molto maggiori di quelle di un tipico combustibile chimico ovvero di un motore nucleare classico. Pertanto, una data velocità finale del razzo può essere ottenuta con una massa di propellente sostanzialmente minore, che a sua volta estende la potenziale distanza raggiungibile nel viaggio o, in alternativa, ne abbrevia la durata.

— Il gas (idrogeno) lavora in buona approssimazione ad una pressione pressoché costante nell'intervallo $4 \div 20$ bar. Si noti che questo



campo di variazione della pressione è solo indicativo, poiché (1) il meccanismo di riscaldamento è per lo più indipendente dalla pressione e (2) le perdite dovute alle radiazioni sono influenzate solo molto lentamente dalla pressione di funzionamento (allargamento delle linee di assorbimento in funzione della pressione, ecc.). L'idrodinamica ed il processo di riscaldamento mediante FF sono funzioni del fattore di scala (pressione \times dimensione) finché il comportamento del gas è prossimo a quello di un gas perfetto. Considerazioni relative al riflettore di neutroni possono suggerire che il dispositivo più leggero sia quello con il nocciolo più piccolo, vale a dire alla pressione massima possibile. Tuttavia non è vantaggioso costruire il nocciolo molto più piccolo dello spessore richiesto del riflettore. Inoltre, la temperatura di ingresso può essere fissata arbitrariamente; la temperatura di uscita è dell'ordine di 9.500 K ed è limitata, come già illustrato nelle sezioni precedenti, dalle perdite per irraggiamento del gas caldo. Esiste pertanto una sostanziale libertà di scelta dei parametri il cui valore dipenderà dalle applicazioni.

Sulla base di queste considerazioni, si arriva ad un concetto di motore che è basato sui seguenti quattro principali componenti, (1) il riflettore, (2) la regione di riscaldamento mediante FF, (3) la regione di espansione e di scarico del gas e (4) il sistema di raffreddamento. Questi componenti sono descritti qui di seguito in maggiore dettaglio.

Si faccia riferimento alla Figura 19 per lo schema fondamentale del motore. La Figura 20 rappresenta una vista in sezione trasversale lungo il piano mediano. Le dimensioni ed il numero dei tubi sono puramente indicativi.

5.2- Il riflettore

Esso contiene e riflette i neutroni provenienti dal nucleo fissile. Due elementi principali (solidi) di elevata purezza sono candidati eccellenti a costituire il moderatore, a causa del loro elevato potere riflettente: (I) Carbonio (grafite, fibre di carbonio) o (II) Berillio (metallico o BeO).

Vi è sostanziale libertà nella realizzazione del riflettore. Per esempio, se richiesto dalla minimizzazione del peso, il moderatore potrebbe essere costituito da diversi strati:

5.2.1) Un primo strato interno che riflette in

maniera molto efficiente i neutroni (per esempio BeO), seguito da

5.2.2) Un secondo strato più sottile, costituito per esempio da un composto dell'idrogeno, poiché l'idrogeno possiede una lunghezza di diffusione $L = 1/k = \sqrt{D/\Sigma_{catt}}$ molto più breve ma un valore meno favorevole $F = 1/\sqrt{kD}$.

5.2.3) Il moderatore può essere rivestito sull'esterno con uno strato sottile (alcuni centimetri) di un materiale che assorbe fortemente i neutroni, come ad esempio CB₄, allo scopo di ridurre la fuga nell'ambiente circostante.

Il riflettore 10 ha un coperchio mobile 11, che viene impiegato anche per la ricarica del combustibile. Questo è anche il luogo naturale dove collocare le barre di controllo 12 (costituite ad esempio da CB₄) inserite ad una profondità controllabile entro 10 come necessario per regolare il fattore di moltiplicazione k che determina la criticità. Esso ha anche una apertura 13, attraverso la quale il propellente viene scaricato.

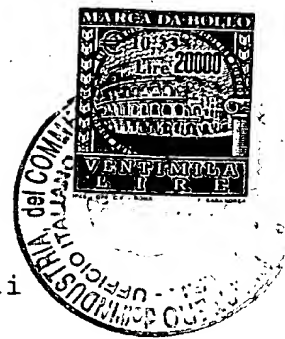
Si fa infine uso di appropriate tubazioni per l'introduzione (14) e l'uscita (15) del liquido refrigerante (ad esempio Litio fuso). La temperatura della cavità del moderatore determina

l'energia media dei neutroni.

5.3- La regione di riscaldamento con FF

Entro la cavità del riflettore sono collocati un certo numero di tubi riscaldanti 16 (solo uno di essi è rappresentato in Figura 19 per chiarezza), la cui struttura è già stata descritta precedentemente. L'Americio 5 (o altro combustibile equivalente) in adatta forma chimica, come descritto sopra nel paragrafo 3, viene depositato su una struttura tubolare 4, sottile ma robusta (Figura 5). La stessa struttura (Figura 5) deve anche permettere l'iniezione da parte della parete di un flusso capillare di idrogeno gassoso 6, che è scaricato attraverso l'estremità aperta del tubo 7. I tubi sono trattenuti saldamente al loro posto con l'aiuto di una struttura di bloccaggio 17 (che si suppone venga sbloccata allo scopo di rimuovere i tubi per la ricarica del combustibile) contro una solida piastra di ritegno 18, che è saldamente ancorata alla struttura del riflettore. La struttura è molto simile a quella di un reattore ordinario, con i tubi che sostituiscono gli elementi di combustibile.

Come vedremo più avanti, il flusso di gas



propellente, giunto all'interno dei tubi, viene poi trasportato attraverso la struttura di bloccaggio 17 e si muove all'interno della piastra di ritegno 18. La piastra 18 separa due volumi principali del motore, la parte superiore 19, in cui sono collocati i tubi e che contiene il liquido refrigerante, e la parte di fondo 20, che contiene il gas propellente diretto verso la gola 21 e l'ugello 22. La piastra di base assicura perciò la separazione tra il liquido refrigerante da un lato e il gas della regione di ristagno dall'altro. Il refrigerante viene anche impiegato per raffreddare le pareti calde nella regione 20, con l'impiego di un appropriato rivestimento 23. Eventualmente questo rivestimento potrebbe fornire anche un certo flusso di idrogeno per il raffreddamento "a traspirazione".

Tutti i materiali da impiegare per la costruzione di questa sezione devono simultaneamente soddisfare un certo numero di requisiti, sebbene in misura diversa, in dipendenza dalle funzioni specifiche:

5.3.1) La loro sezione d'urto macroscopica combinata di assorbimento per i neutroni deve essere molto piccola, allo scopo di mantenere la

trasparenza dei neutroni entro la cavità del moderatore, con la ovvia eccezione del combustibile fissile. La frazione dei neutroni assorbiti da un dato componente è pressoché proporzionale al prodotto (massa totale impiegata) \times (sezione d'urto termica). Alcune considerazioni dovrebbero essere fatte anche riguardo alle possibili perdite di neutroni durante il processo di termalizzazione, per il quale la relativa sezione d'urto integrale di risonanza.

5.3.2) Essi devono essere capaci di resistere ai danni da radiazione principalmente dovuti al flusso dei neutroni termici e, per lo strato fissile, anche degli FF. Fortunatamente, quest'ultimo effetto è limitato dalla penetrazione fino a spessori di circa 10 mg/cm^2 . Come viene messo in evidenza nella sezione 3.4, il danno da radiazione dovuto a questo flusso di particelle cariche è di circa 30 d.p.a. per il tasso di bruciamento indicato, corrispondente alla metà del combustibile fissionato. Il danno da radiazione della parte restante del motore, dovuto al flusso di neutroni, è molto minore, tipicamente dell'ordine di 1 d.p.a.

5.3.3) Essi devono mantenere buone proprietà

meccaniche nel campo delle temperature di lavoro, che è stato indicativamente fissato dell'ordine di 1.500 K, poiché temperature molto minori implicano una eccessiva superficie dei pannelli radianti. Essi devono resistere alle sollecitazioni termiche durante il funzionamento ed avere buona stabilità dimensionale.

5.3.4) Essi devono essere compatibili principalmente con il gas propellente (idrogeno) e con il liquido refrigerante (Litio fuso). Lo strato di combustibile deve avere eccellente adesione al mezzo di supporto. Le incompatibilità potrebbero essere risolte con l'impiego di adatti strati di rivestimento.

5.3.5) Essi devono minimizzare il peso associato, che è di primaria importanza in una qualsiasi applicazione per il volo.

Tra le possibili scelte del materiale principale che costituisce il motore, sarà discusso in un certo dettaglio l'uso di fibre e matrice di carbonio composite. Questi materiali, che sono relativamente nuovi, sono in continuo sviluppo e hanno prestazioni in rapido miglioramento. Il lavoro di sviluppo effettuato nel cosiddetto progetto ITER, che concerne la fusione



termonucleare, ed in particolare per un componente critico chiamato "divertore" è interessante, poiché esso è simultaneamente esposto a (i) intenso irraggiamento con neutroni, (ii) elevata temperatura ed elevate sollecitazioni termiche, e (iii) plasma di idrogeno molto caldo. I requisiti sono perciò abbastanza prossimi a quelli della presente applicazione.

Come esempio si riportano in Tabella 4 le proprietà di un materiale composito costituito da fibre di carbonio sviluppato per l'ITER.

Questo prodotto è stato provato sotto irraggiamento con neutroni nell'intervallo da 0,8 a 5 d.p.a. ed a temperatura di 1.500 °C, che sono i nostri requisiti. I risultati sono estremamente promettenti:

5.3.6) Le variazioni dimensionali sono piccole, tipicamente dell'ordine di $0,1\% \div 0,2\%$.

5.3.7) La conducibilità termica, sebbene alquanto influenzata alle basse temperature (fattore di riduzione di $0,75 \div 0,8$ a 800 °C), rimane inalterata al di sopra di 1.000 °C, per effetto della ricottura, favorita dalla temperatura elevata, dei difetti indotti dalla radiazione.

5.3.8) Gli effetti dell'irraggiamento sulla

dilatazione termica sono molto piccoli. Incidentalmente, si noti che la dilatazione termica del materiale è molto piccola, tipicamente di un ordine di grandezza minore di quella delle leghe metalliche usate in condizioni simili.

5.3.9) L'irraggiamento migliora il modulo di Young, con un incremento di circa $30 \div 40\%$ dopo 1 d.p.a. Questo effetto è accoppiato ad un miglioramento del modulo di Young e del carico di rottura con la temperatura ($+15\%$ a $1.500\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Tabella 4. Proprietà esemplificative dei composti di fibra di carbonio (X, Y, Z) sviluppati per ITER.

SEP NB31	X	Y	Z	
Temperatura di sublimazione	3.600			$^{\circ}\text{C}$
Densità	1,90			g/cm^3
Dilatazione termica	0,4	1	2,1	$10^{-6}/^{\circ}\text{K}$
Conducibilità termica	154	58	55	$\text{W.m}^{-1}.^{\circ}\text{K}^{-1}$
Modulo di Young	107	20	12	GPa
Carico di rottura	130	30	19	GPa

In generale alle temperature previste per la nostra applicazione, gli effetti dovuti all'irraggiamento di neutroni sono piccoli ed il materiale mantiene in pratica tutte le proprietà principali dei campioni non irraggiati.

Pertanto, sembra appropriato assumere che i tubi di riscaldamento con FF possono essere costruiti impiegando fibre e matrice di carbonio composite. Un'altra importante proprietà di questi

materiali è il fatto che il composto è poroso e permeabile all'idrogeno (questo è anche stato studiato in connessione con il progetto ITER). Queste caratteristiche dipendono fortemente dalle particolarità del composto e la permeabilità può essere variata di molti ordini di grandezza con l'aiuto di processi specifici di compattamento locale o di drogaggio. Nel nostro caso questa caratteristica ha due importanti applicazioni:

5.3.10) Essa permette l'introduzione del propellente (idrogeno) nei tubi di riscaldamento con FF. È stato verificato numericamente che, affinché una lastra di qualche millimetro di spessore con un numero limitato di canali stretti e cavi, in cui l'idrogeno viene introdotto sotto pressione, possa fornire la necessaria velocità di alimentazione del propellente, essa dovrebbe essere dell'ordine di 1g/s/m^2 . L'impiego di un adatto complesso di barriera/rivestimento impedisce la fuga del gas attraverso lo strato esterno del tubo fino a raggiungere il liquido refrigerante. Lo

schema di principio della parete "con perdita" del tubo è rappresentato in Figura 21.

5.3.11) Essa permette di raffreddare le pareti della camera e la gola dell'ugello, esposte a gas

molto caldo, fino ad una temperatura accettabile mediante il cosiddetto raffreddamento da convezione per traspirazione.

I dettagli di una struttura esemplificativa del tubo sono rappresentati in Figura 21, dove viene mostrata un piccolo segmento della sezione circolare del tubo 28. Il volume interno 36 del tubo è riempito di gas, mentre il tubo è immerso nel refrigerante 29. Il tubo è fatto di una matrice di carbonio, con appropriato orientamento delle fibre 33 ed esso è poroso al gas che è alimentato attraverso una pluralità di condotti sottili 32 previsti nella parete del tubo. Un rivestimento metallico 30 copre la superficie esterna dei tubi per impedire che il gas sfugga verso la regione del refrigerante. Questo rivestimento 30 è anche usato per assicurare la compatibilità con il liquido refrigerante. Esso può essere costituito, per esempio, di carburo di titanio. Entro le pareti dei tubi un rivestimento aggiuntivo 31, sulle porzioni dei condotti 32 di alimentazione del gas orientati verso l'esterno del tubo, può contribuire a dirigere il flusso dei gas nella direzione del volume interno 36 del tubo. Il combustibile depositato sulla parete interna del

tubo 34 può essere striato, con molte piccole fessure 35 che permettono al gas di uscire verso l'interno del tubo, sebbene la permeabilità del deposito sottile verso l'idrogeno sia molto elevata ed anche uno strato uniforme ma molto sottile non costituirà una barriera al flusso di gas.

La compatibilità chimica delle fibre e matrice di carbonio composite con l'idrogeno è stata studiata e, sebbene alle minori temperature vi sia la possibilità di formazione di CH_4 , tale effetto è fortemente attenuato alle temperature elevate. La iniezione di una piccola quantità di CH_4 eventualmente formatosi nella camera di riscaldamento con FF dovrebbe essere senza pericolo, mentre ci si può aspettare che gli effetti di erosione sul materiale composito siano trascurabili. D'altra parte, in un ambiente ricco di idrogeno, l'ossidazione è fortemente ostacolata.

Riguardo alla compatibilità chimica del carbonio con il litio si devono considerare tre effetti:

5.3.12) Formazione di un carburo (Li_2C_2).

5.3.13) Solubilità del carbonio nel metallo fuso con complessi fenomeni di trasporto.

5.3.14) Rigonfiamento del materiale a causa



della penetrazione del metallo fuso all'interno del materiale composito.

Tutti questi effetti devono essere studiati prima di consentire un contatto diretto tra il refrigerante e le fibre di carbonio. Tuttavia, questo contatto può essere eliminato, poiché come si può vedere dalla Figura 21, allo scopo di evitare che l'idrogeno sfugga entro il refrigerante, viene usato un appropriato rivestimento superficiale 30 sulla superficie esterna dei tubi, che potrebbe assicurare la separazione tra il refrigerante ed il materiale composito di carbonio. Un materiale eccellente per questo rivestimento è carburo di titanio.

Per concludere, la disposizione generale della regione di riscaldamento con FF consiste di un numero relativamente grande di tubi, fatti del materiale composito di carbonio ed immersi in un bagno refrigerante a bassa pressione. Questo ricorda la struttura di un reattore ordinario, con i tubi cavi che sostituiscono gli elementi di combustibile.

Analogamente agli elementi di combustibile i tubi sono inseriti in una robusta piastra di base di supporto. I tubi singoli sono amovibili per la

ricarica del combustibile ed il giunto di adattamento alla piastra assicura il supporto meccanico ed anche l'alimentazione di idrogeno. I tubi sono trattenuti soltanto dalla piastra di base di, supporto essendo altrimenti liberi.

La ricarica del combustibile, in analogia con un reattore, viene effettuata estraendo i tubi dalla piastra di supporto, una volta che il coperchio superiore del riflettore sia stato rimosso ed in assenza del liquido refrigerante. La procedura di estrazione del combustibile può essere effettuata dal coperchio superiore della cavità del moderatore seguendo la consueta tecnica utilizzata per i reattori ordinari, per esempio con una coppia di piastre di copertura rotanti.

Sono evidentemente possibili disposizioni più complesse. Per esempio, gruppi di tubi potrebbero essere disposti in sottounità (fasci di combustibile) che sono rimosse separatamente come blocchi durante la ricarica del combustibile nello spazio. Ciascuna di queste sottounità potrebbe

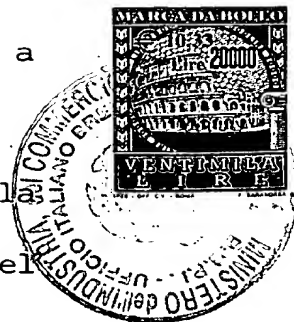
avere il suo ugello di espansione e scarico del gas. Evidentemente, tutte le sottounità del motore sono situate all'interno di un singolo volume del riflettore.

5.4- La regione di espansione e scarico del gas

Con riferimento nuovamente alla Figura 19, il gas caldo proveniente dai tubi viene raccolto nella regione di ristagno 20. Questa parte è molto simile a quella di un ordinario motore a razzo con propellente chimico, eccetto che la temperatura di ristagno è molto più elevata (per esempio 9.500 K e H atomico nel nostro caso contro circa 3.500 K e miscela stechiometrica di H_2 e O_2 per un motore chimico con H/O liquidi). La pressione nel motore è mantenuta al valore prefissato mediante un ristretto foro 21, la gola, attraverso il quale il gas sfugge verso un cono di espansione 22, in cui l'energia termica viene trasformata in velocità del gas e quindi in spinta. È molto probabile che il gas attraverso l'ugello e nel cono di espansione rimanga idrogeno atomico ("flusso congelato"), che ha la massa atomica più piccola ($A = 1$) e perciò un elevato impulso specifico. Le pareti della gola e le parti circostanti sono raffreddate con Litio 23 e mantenute ad una temperatura accettabile mediante un "cuscino" di gas più freddo mediante traspirazione. La temperatura nel cono di espansione è molto bassa, ma si può verificare una

conversione esotermica atomico-molecolare a contatto con superfici solide.

L'efficienza termodinamica globale della conversione del calore in spinta è tipicamente del 60 ÷ 70%.



5.5- Il sistema refrigerante

La sua funzione è quella di dissipare nello spazio il calore non convertito in propulsione ed esso è progettato in modo tale da dissipare l'intera potenza nucleare prodotta, per esempio in caso di malfunzionamento della sorgente di gas.

Questo sistema è accoppiato alla sorgente di calore (le pareti esterne dei tubi) mediante il refrigerante in circolazione (il tubo di calore). Perciò la temperatura dei tubi è in stretta relazione con la temperatura alla quale il calore viene irradiato, a sua volta correlato alla superficie necessaria attraverso la dipendenza da T_{rad}^4 della legge di Stefan di radiazione del corpo nero. La superficie totale del radiatore S_{rad}

(questa è di fatto la superficie del corpo nero equivalente ed è uguale all'effettiva superficie moltiplicata per il coefficiente di assorbimento della superficie) è ovviamente proporzionale alla

superficie S_{lamina} totale del materiale fissile (^{242}mAm) ed è fortemente dipendente dalla temperatura T_{rad}

$$S_{\text{rad}} = S_{\text{lamina}} (dW_{\text{fiss}}/dS_{\text{lamina}}) (64,81^\circ\text{K}/T_{\text{rad}})^{1/4}$$

La dipendenza attuale per valori tipici della potenza di fissione specifica è rappresentata in Figura 22. È evidente che allo scopo di assicurare un raffreddamento effettivo, il radiatore deve funzionare alla temperatura più elevata possibile. Un buon valore di riferimento potrebbe essere il punto di ebollizione del Litio a bassa pressione (1 bar assoluto) corrispondente a 1.342°C . A questa temperatura il rapporto $S_{\text{rad}}/S_{\text{lamina}}$ è rispettivamente 5,12, 2,56 e 1,28 per $dW_{\text{fiss}}/dS_{\text{lamina}} = 200, 100$ e 50 W/cm^2 , che sono valori ragionevoli. Il calore latente di ebollizione del ^7Li , che probabilmente verrebbe sfruttato per il raffreddamento (concetto del reattore bollente) è di $19,24 \text{ kJoule/g}$ ($134,7 \text{ kJoule/mole}$) ed il raffreddamento, ad esempio, di 100 MWatt di potenza richiede l'ebollizione e la conseguente condensazione di soli $5,2 \text{ kg/s}$ ($9,7 \text{ litri/s}$) di refrigerante. Perciò, per le considerazioni qualitative che seguono, si assumerà una temperatura indicativa del motore 1.500 K .

La temperatura del riflettore nella cavità del moderatore, per ragioni pratiche, è probabilmente molto prossima a quella del motore. Perciò, la massa del motore funzionerà alla stessa temperatura.

L'eliminazione del calore in eccesso è un problema nello spazio. Come già messo in evidenza, si assume un refrigerante costituito da Litio fuso al punto di ebollizione con bassa pressione (la pressione esatta dipenderà dalla temperatura reale di funzionamento). Il Litio viene estratto come vapore ed inviato ai pannelli irradianti, dove esso ricondensa alla forma liquida. Il calore latente di ebollizione ha il valore relativamente elevato di 19,24 kJoule/g. Come già messo in evidenza, la dissipazione di una potenza di 100 MWatt richiede l'ebollizione e la susseguente condensazione di soli 5,2 kg/s (9,7 litri/s) di refrigerante.

Si riporta in Figura 23, per scopi illustrativi, uno schema di principio molto semplificato del sistema di raffreddamento. Il

volume del motore riempito di refrigerante 40

produce Litio bifase in ebollizione che viene trasferito attraverso 41 ad un separatore 42 del liquido dal vapore. Il liquido viene trasferito

lungo 43 ad una pompa 48 e reiniettato attraverso 49 nel volume 40 di refrigerante del motore. La frazione nello stato di vapore viene portata attraverso 44 ai pannelli radianti 45, dove viene lentamente ritrasformata in liquido. La fase liquida risultante viene portata attraverso 46 ad una pompa 47 ed attraverso la tubazione 49 al volume 40 di refrigerante del motore.

Un sistema di pannelli irradianti 45 di tale superficie è esposto al rischio di perforazione a causa del bombardamento da parte dei meteoriti. È perciò necessaria una segmentazione fine del flusso di refrigerante nei pannelli, con speciali valvole di tenuta per evitare una perdita massiva nello spazio, in caso di formazione accidentale di fori.

5.6- Prestazioni previste del gas riscaldato

Allo scopo di trasformare il calore ad alta temperatura in spinta, il gas viene espanso nel cono di espansione, convertendo l'energia termica (entalpia) risultante dal riscaldamento del gas in energia cinetica di spinta, con conseguente variazione nella composizione del gas. In un qualunque punto, la velocità v è determinata dalla conservazione dell'energia:

$$v = \sqrt{2(E_{rist} - E)}$$

il numero di Mach e l'area A riferita a quella A_{gola} della regione della gola sono:

$$M = v \sqrt{\frac{\rho}{p}}; \quad \frac{A}{A_{gola}} = \frac{\rho_{gola} v_{gola}}{\rho v}$$

Perciò è possibile calcolare, per ciascun valore specifico della pressione del gas che si espande isoentropicamente lungo il cono, i parametri rilevanti del gas, ed in particolare la velocità del gas, cioè l'impulso specifico, o alla pressione di uscita o quando l'ugello scarica in un vuoto perfetto.

Un assunto principale della discussione precedente è l'esistenza di equilibrio chimico del gas lungo tutto l'ugello di espansione. Se questo assunto è ora reso meno severo, due reazioni di ricombinazione sono rilevanti per quanto riguarda il mantenimento dell'equilibrio termodinamico nel processo di raffreddamento:

5.6.1) La ricombinazione del plasma elettronico in atomi neutri. La reazione primaria è $p + e^- \rightarrow H^0 + \gamma$, cioè il processo inverso della fotoionizzazione. Questo processo non è di rilievo poiché, per $T_{\infty} = 9.500 \text{ K}$, la quantità di ionizzazione è molto piccola.

5.6.2) La ricombinazione degli atomi neutri in



molecole, cioè $H^\circ + H^\circ \rightarrow H_2$. Questa reazione, come è stata scritta qui, non è cinematicamente possibile, poiché non si possono conservare immediatamente sia energia che quantità di moto. Perciò questa forma di ricombinazione può solo verificarsi per il tramite di processi di ordine superiore che implicano (1) collisioni contemporanee con molti corpi, come ad esempio $3H^\circ \rightarrow H^\circ + H_2$ che richiedono una pressione più elevata, oppure (2) l'emissione di un fotone oppure, con maggiore probabilità, di un elettrone di Auger $H^\circ + H^\circ \rightarrow H_2 + \gamma(e)$. Tuttavia, la soglia per quest'ultima reazione è il potenziale di ionizzazione ed è molto oltre le energie tipiche implicate.

Perciò è molto probabile che questa ricombinazione rimarrà "congelata", almeno a pressioni relativamente basse, e che la propulsione del motore sarà ottenuta principalmente tramite l'emissione di atomi di idrogeno neutri. Perciò il calcolo è stato ripetuto per un gas in cui lo stato atomico fornito dalla gola, conservativamente ad una temperatura maggiore di quella di ricombinazione, è preservato durante tutto il moto nel cono di espansione.

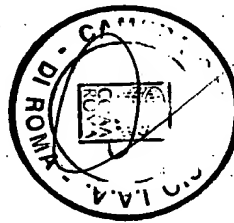
La velocità di scarico e l'impulso specifico contro il vuoto nell'assunto di equilibrio chimico e di flusso completamente "congelato" per la pressione di ristagno di 6 atmosfere sono riportati in grafico nella Figura 24 in funzione della temperatura di ristagno. Come già evidenziato, la temperatura di ristagno attesa è 9.500 K.

La perdita di prestazioni con la propulsione ad idrogeno atomico non è tanto grande quanto ci si potrebbe attendere. Invero, sebbene la reazione esotermica di ricombinazione in molecole di idrogeno sia assente, il valore medio di A del gas emesso è dimezzato rispetto all'idrogeno molecolare, aumentando così la velocità e conseguentemente l'impulso specifico di un fattore $\sqrt{2} = 1,41$, che è apprezzabile. Alla temperatura di ristagno di $9.300 \div 9.400$ K, limitata da radiazione, si ottiene un flusso congelato con un impulso specifico $I_{sp} = 2.000$ s, da paragonare con $I_{sp} = 2.540$ s per la completa ricombinazione (un miglioramento del 24%) e con $I_{sp} = 430$ s dei migliori motori chimici.

Il flusso di idrogeno atomico è molto freddo (220 K, a paragone con i 2.300 K con piena ricombinazione), il che rappresenta un vantaggio

nella progettazione del cono di espansione. Si deve notare, tuttavia, che la ricombinazione può avvenire rapidamente a contatto con le pareti, e bilancia la quantità di moto mancante necessaria perché la reazione avvenga. Questo è un effetto ben noto, su cui si basa la cosiddetta "torcia a plasma". La ricombinazione veloce produce abbondante calore al contatto con le superfici solide, il che potrebbe eliminare il vantaggio sopra menzionato di una bassa temperatura del gas.

Maurizio SARPI
della
Studio FERRARIO



RM 2000 A 000521
RIVENDICAZIONI

1. Metodo di riscaldamento di un gas, in cui un gas è introdotto in almeno una camera avente una parete rivestita con materiale fissile, ed il materiale fissile è esposto ad un flusso di neutroni per indurre la fissione, in modo che frammenti di fissione siano rilasciati nella camera.

2. Metodo secondo la rivendicazione 1, in cui la fissione è indotta in condizioni critiche.

3. Metodo secondo una delle rivendicazioni precedenti, in cui il rivestimento di materiale fissile ha un contenuto fissile inferiore a 10 mg/cm², preferibilmente nel campo da 1 a 3 mg/cm².

4. Metodo secondo una delle rivendicazioni precedenti, in cui il materiale fissile comprende come isotopo fissile ^{242m}Am.

5. Metodo secondo una delle rivendicazioni da 1 a 3, in cui il materiale fissile comprende come isotopo fissile ²³³U, ²³⁵U o ²³⁹Pu.

6. Metodo secondo la rivendicazione 4 o 5, in cui il materiale fissile è sotto forma di un carburo.

7. Metodo secondo una delle rivendicazioni precedenti, in cui detta almeno una camera è



situata all'interno di un involucro circondato da un riflettore di neutroni.

8. Metodo secondo la rivendicazione 7, in cui il riflettore di neutroni comprende carbonio, berillio oppure ossido di berillio.

9. Metodo secondo la rivendicazione 7, in cui il riflettore di neutroni comprende uno spessore di materiale a base di carbonio che circonda l'involucro, detto spessore, in cm, essendo almeno $50/d$ e preferibilmente almeno $150/d$, dove d è la densità di detto materiale a base di carbonio espressa in g/cm^3 .

10. Metodo secondo una delle rivendicazioni da 7 a 9, in cui il riflettore di neutroni presenta cavità per ricevere barre di controllo amovibili che assorbono neutroni.

11. Metodo secondo una delle rivendicazioni da 7 a 10, in cui una pluralità di camere è disposta nell'involucro circondato dal riflettore di neutroni per ricevere il gas riscaldato.

12. Metodo secondo una delle rivendicazioni da 7 a 11, in cui detta almeno una camera è in comunicazione con un ugello di scarico attraverso una gola prevista nel riflettore di neutroni.

13. Metodo secondo la rivendicazione 12, in

cui l'involucro ha una regione di combustibile dove è situata detta almeno una camera ed una regione di raccolta del gas caldo tra la regione del combustibile e la gola, in cui un mezzo di raffreddamento viene messo in circolazione in un circuito, avente una prima porzione su una faccia del riflettore di neutroni adiacente alla regione di raccolta del gas caldo ed una seconda porzione situata nella regione del combustibile e separata dalla regione di raccolta del gas caldo mediante un setto divisorio avente una apertura in cui è inserita una estremità aperta della camera rivestita, ed in cui la parete della camera rivestita separa la camera da detta seconda porzione del circuito di raffreddamento all'interno della regione del combustibile.

14. Metodo secondo una delle rivendicazioni precedenti, in cui detta almeno una camera ha una forma tubolare.

15. Metodo secondo una delle rivendicazioni precedenti, in cui la parete di detta almeno una camera è fatta di un materiale poroso, ed in cui il gas è introdotto attraverso pori del materiale poroso della parete.

16. Metodo secondo la rivendicazione 15, in

cui detto materiale poroso è materiale a base di carbonio.

17. Metodo secondo la rivendicazione 15 o 16, in cui la parete è rivestita con uno strato a tenuta di gas su una sua faccia posteriore rispetto alla camera ed al rivestimento di materiale fissile.

18. Metodo secondo la rivendicazione 17, in cui lo strato a tenuta di gas comprende carburo di titanio.

19. Metodo secondo una delle rivendicazioni precedenti, in cui la parete di detta almeno una camera è raffreddata da una sua faccia posteriore rispetto alla camera ed al rivestimento di materiale fissile.

20. Metodo secondo la rivendicazione 13 o 19, in cui come mezzo di raffreddamento viene usato un metallo fuso.

21. Metodo secondo la rivendicazione 20, in cui detto metallo fuso comprende ${}^7\text{Li}$.

22. Dispositivo di riscaldamento di un gas, comprendente almeno una camera per contenere gas avente una parete rivestita con materiale fissile, e mezzi per esporre il materiale fissile ad un flusso di neutroni per indurre la fissione ed il

rilascio di frammenti di fissione nella camera.

23. Dispositivo secondo la rivendicazione 22, in cui il rivestimento di materiale fissile ed i mezzi per esporlo ad un flusso di neutroni sono predisposti ad indurre la fissione in condizioni critiche.

24. Dispositivo secondo la rivendicazione 22 o 23, in cui il rivestimento di materiale fissile ha un contenuto fissile inferiore a 10 mg/cm^2 , preferibilmente nel campo da 1 a 3 mg/cm^2 .

25. Dispositivo secondo una delle rivendicazioni 22 a 24, in cui il materiale fissile comprende come isotopo fissile ^{242}Am .

26. Dispositivo secondo una delle rivendicazioni 22 a 24, in cui il materiale fissile comprende come isotopo fissile ^{233}U , ^{235}U o ^{239}Pu .

27. Dispositivo secondo la rivendicazione 25 o 26, in cui il materiale fissile è sotto forma di un carburo.

28. Dispositivo secondo una delle rivendicazioni 22 a 27, comprendente ulteriormente un riflettore di neutroni che circonda un involuero in cui è situata detta almeno una camera.

29. Dispositivo secondo la rivendicazione 28, in cui il riflettore di neutroni comprende



carbonio, berillio oppure ossido di berillio.

30. Dispositivo secondo la rivendicazione 28, in cui il riflettore di neutroni comprende uno spessore di materiale a base di carbonio che circonda l'involucro, detto spessore, in cm, essendo almeno $50/d$ e preferibilmente almeno $150/d$, dove d è la densità di detto materiale a base di carbonio espressa in g/cm^3 .

31. Dispositivo secondo una delle rivendicazioni da 28 a 30, in cui il riflettore di neutroni presenta cavità per ricevere barre di controllo amovibili che assorbono neutroni.

32. Dispositivo secondo una delle rivendicazioni da 28 a 31, in cui una pluralità di camere è disposta nell'involucro circondato dal riflettore di neutroni per ricevere il gas riscaldato.

33. Dispositivo secondo una delle rivendicazioni da 28 a 32, in cui detta almeno una camera è in comunicazione con un ugello di scarico attraverso una gola prevista nel riflettore di neutroni.

34. Dispositivo secondo la rivendicazione 33, in cui l'involucro ha una regione di combustibile dove è situata detta almeno una camera ed una

regione di raccolta del gas caldo tra la regione del combustibile e la gola, in cui un mezzo di raffreddamento viene messo in circolazione in un circuito, avente una prima porzione su una faccia del riflettore di neutroni adiacente alla regione di raccolta del gas caldo ed una seconda porzione situata nella regione del combustibile e separata dalla regione di raccolta del gas caldo mediante un setto divisorio avente una apertura in cui è inserita una estremità aperta della camera rivestita, ed in cui la parete della camera rivestita separa la camera da detta seconda porzione del circuito di raffreddamento all'interno della regione del combustibile.

35. Dispositivo secondo una delle rivendicazioni da 22 a 34, in cui detta almeno una camera ha una forma tubolare.

36. Dispositivo secondo una delle rivendicazioni da 22 a 35, in cui la parete di detta almeno una camera è fatta di un materiale poroso, ed ulteriormente comprendente mezzi per ~~introdurre il gas nella camera attraverso pori del~~ materiale poroso della parete.

37. Dispositivo secondo la rivendicazione 36, in cui detto materiale poroso è materiale a base di

carbonio.

38. Dispositivo secondo la rivendicazione 36 o 37, in cui la parete è rivestita con uno strato a tenuta di gas su una sua faccia posteriore rispetto alla camera ed al rivestimento di materiale fissile.

39. Dispositivo secondo una delle rivendicazioni da 22 a 38, in cui la parete di detta almeno una camera è raffreddata da una sua faccia posteriore rispetto alla camera ed al rivestimento di materiale fissile.

40. Dispositivo secondo la rivendicazione 34 o 39, in cui un metallo fuso viene usato come mezzo di raffreddamento.

41. Dispositivo secondo la rivendicazione 40, in cui detto metallo fuso comprende ${}^7\text{Li}$.

42. Motore spaziale comprendente un dispositivo di riscaldamento di un gas secondo una delle rivendicazioni da 22 a 41 e mezzi per espellere il gas riscaldato nello spazio per generare una spinta.

~~43. Motore spaziale secondo la rivendicazione 42, in cui il gas riscaldato comprende idrogeno.~~

44. Motore spaziale secondo la rivendicazione 42, in cui il gas riscaldato comprende anidride

carbonica e/o elio e/o argo.

per i Richiedenti

il Rappresentante

Maurizio SARDI
dello
Studio FERRARIO



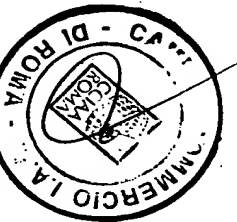
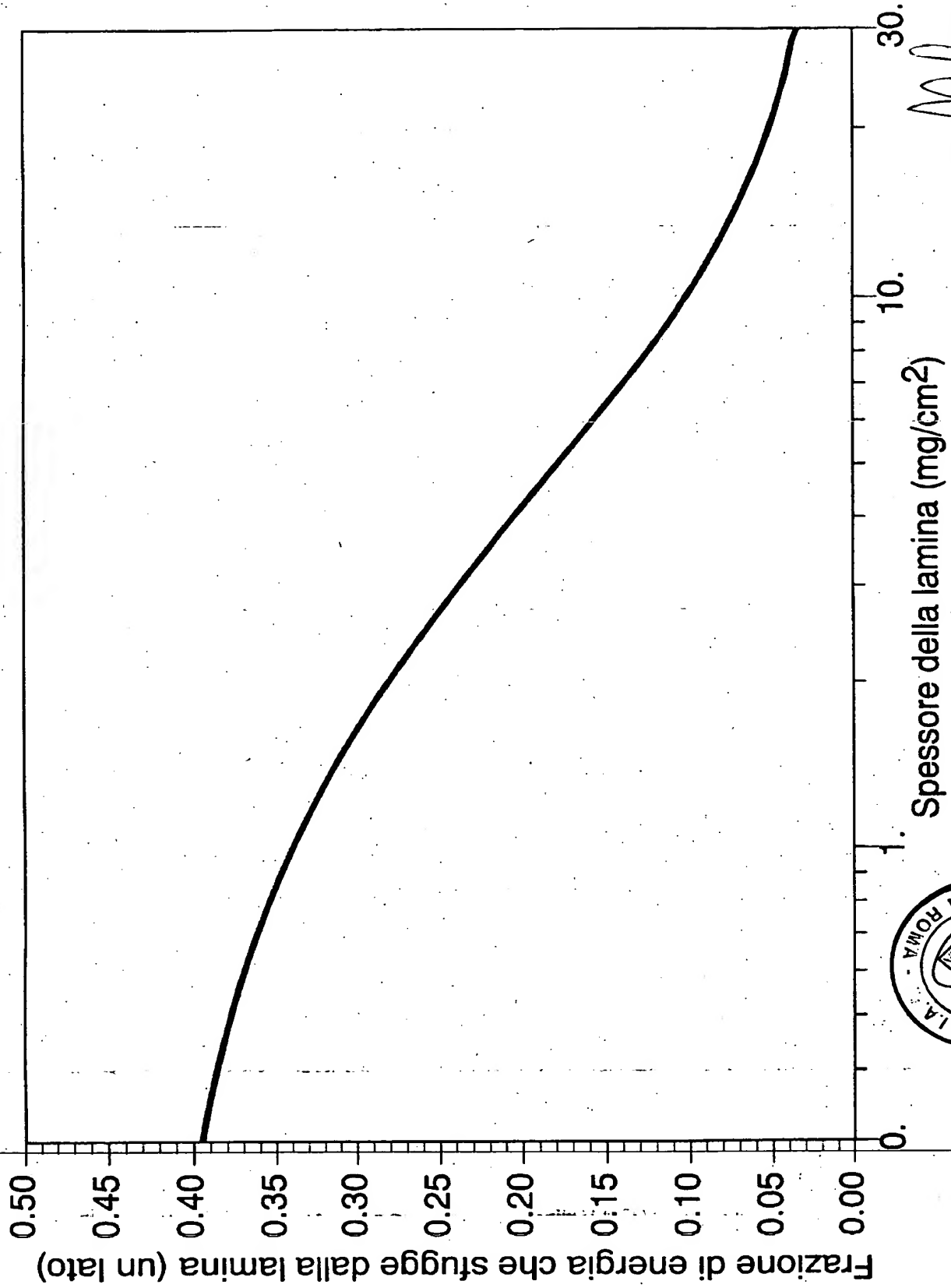


Figura 1

Maurizio SARPI
della
Studio FERRARIO

RM2000 A 000521

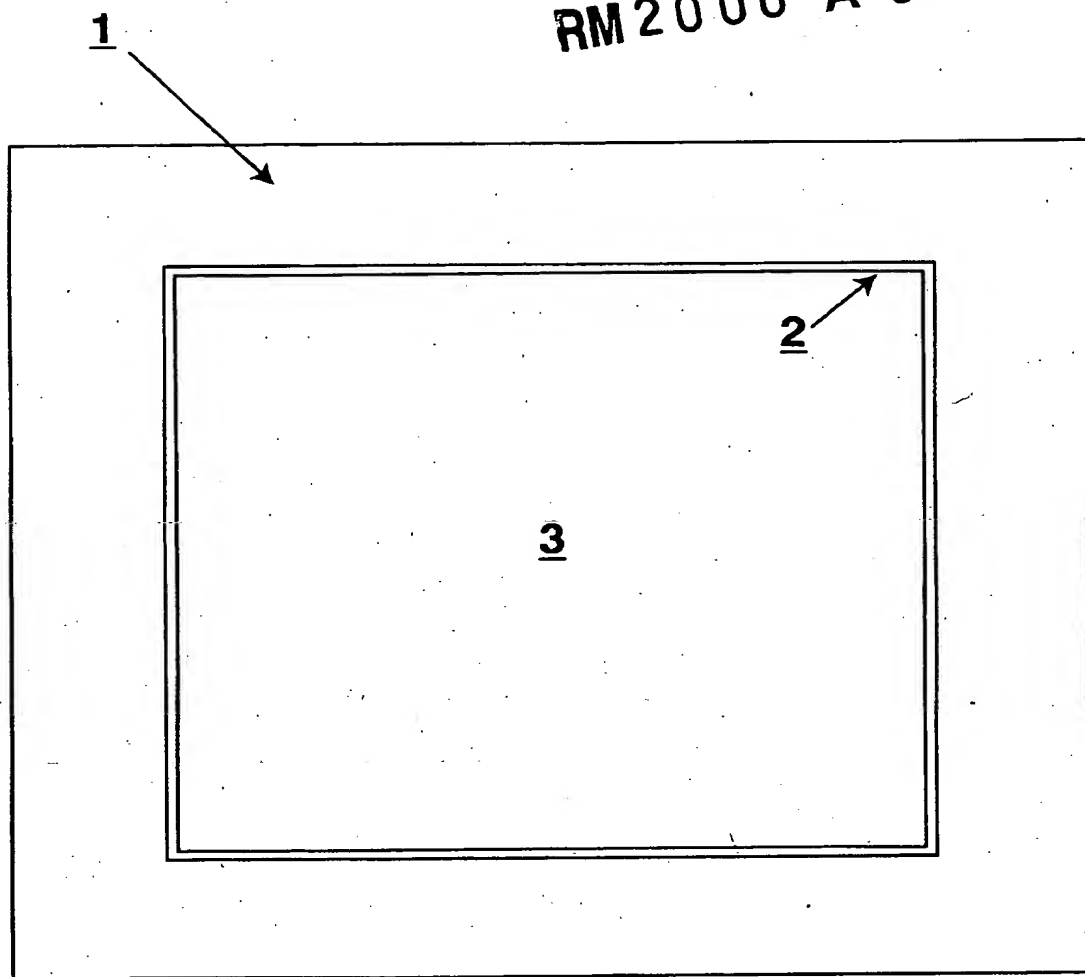
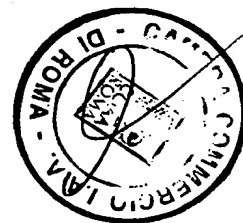


Figura 2



Maurizio SARPI
dello
Studio FERRARIO

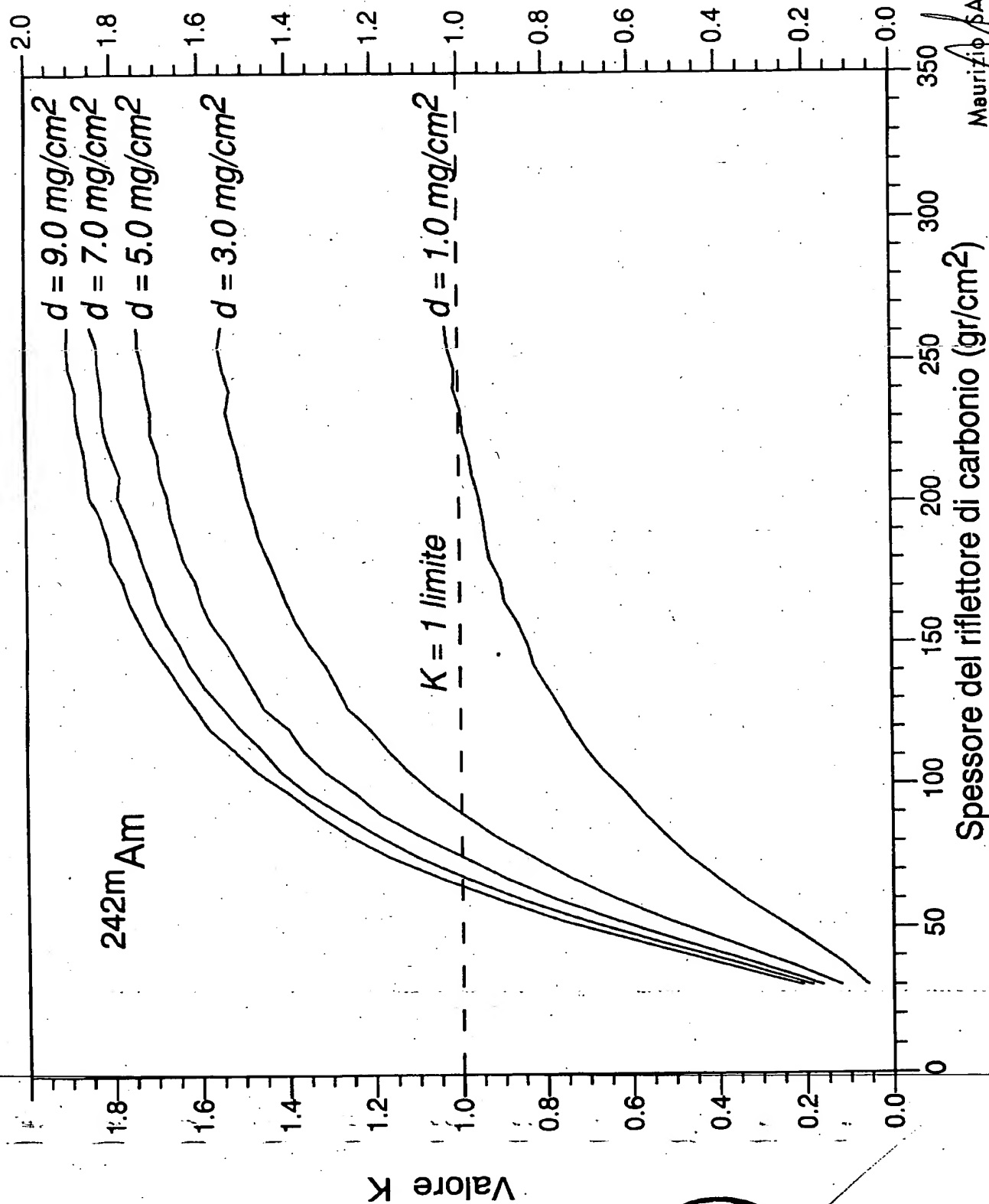
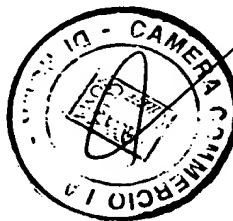


Figura 3

Valore K

RM2000 A 000521

Maurizio SARPI
d Mo
Studio FERRARIO



RM 2000 A 000521

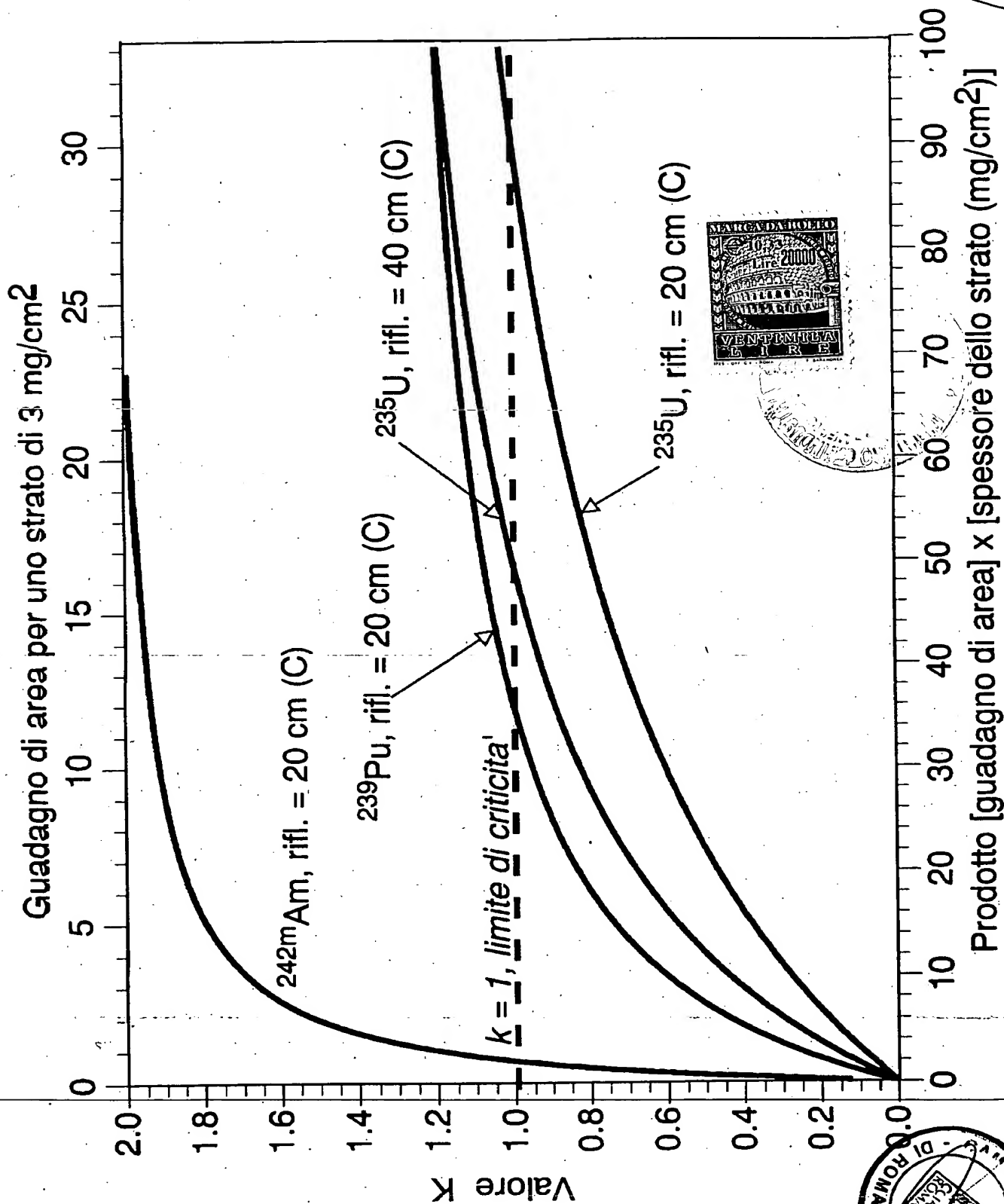
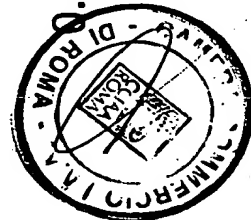
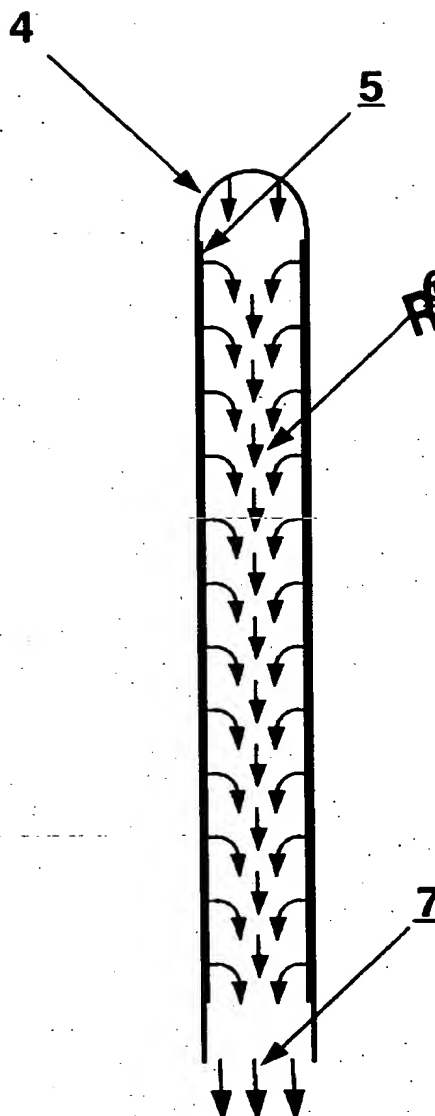


Figura 4

Maurizio SARPI
della
Studio FERRARIO





RM 2000 A 000521

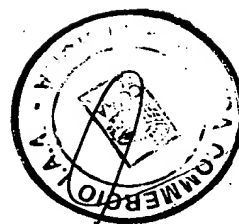


Figura 5

Maurizio SARPI
dello
Studio FERRARIO

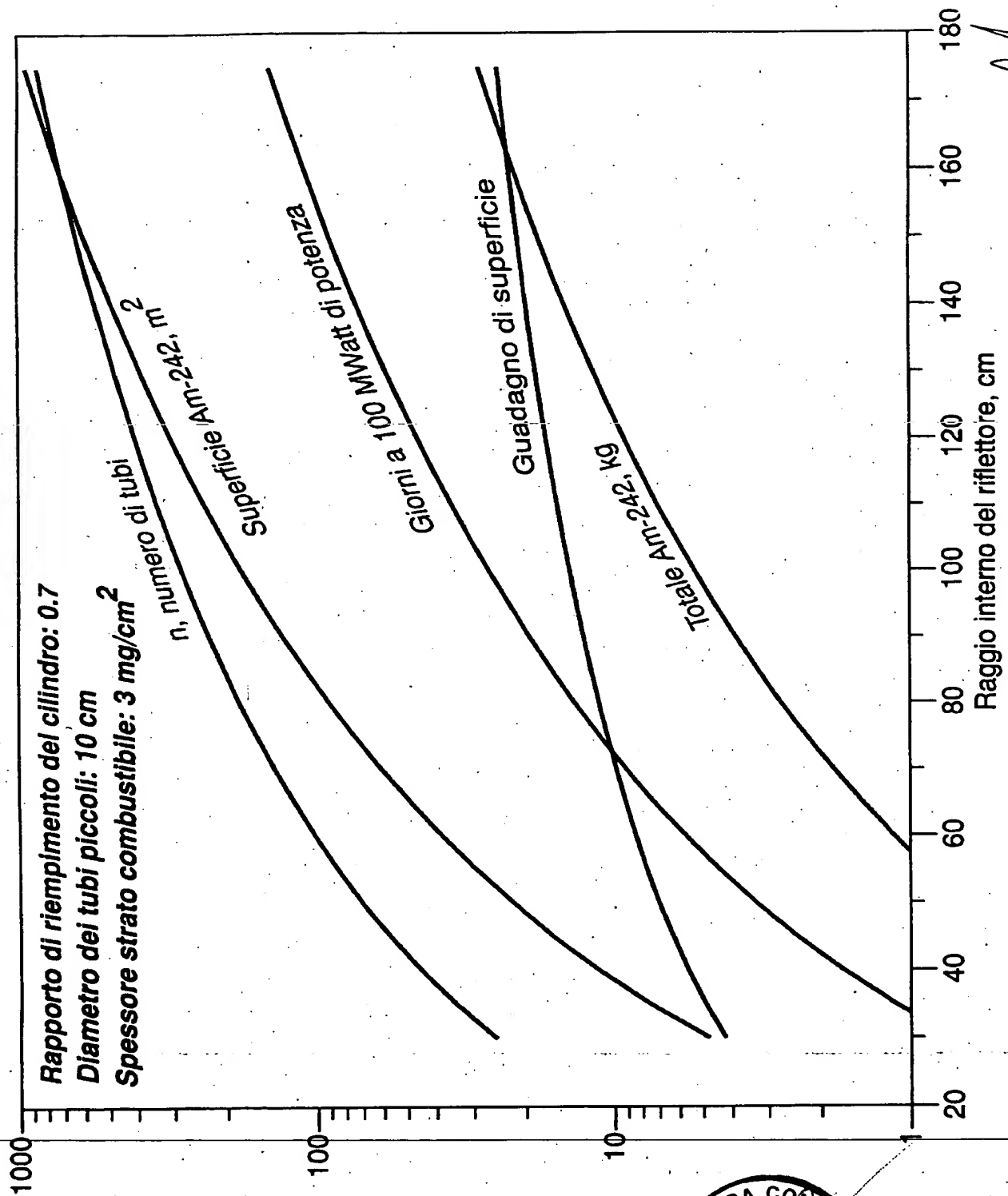
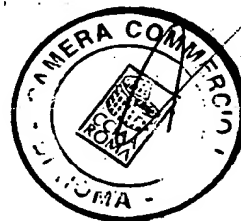


Figura 6

Maurizio SARPI
 dello
 Studio FERRARIO



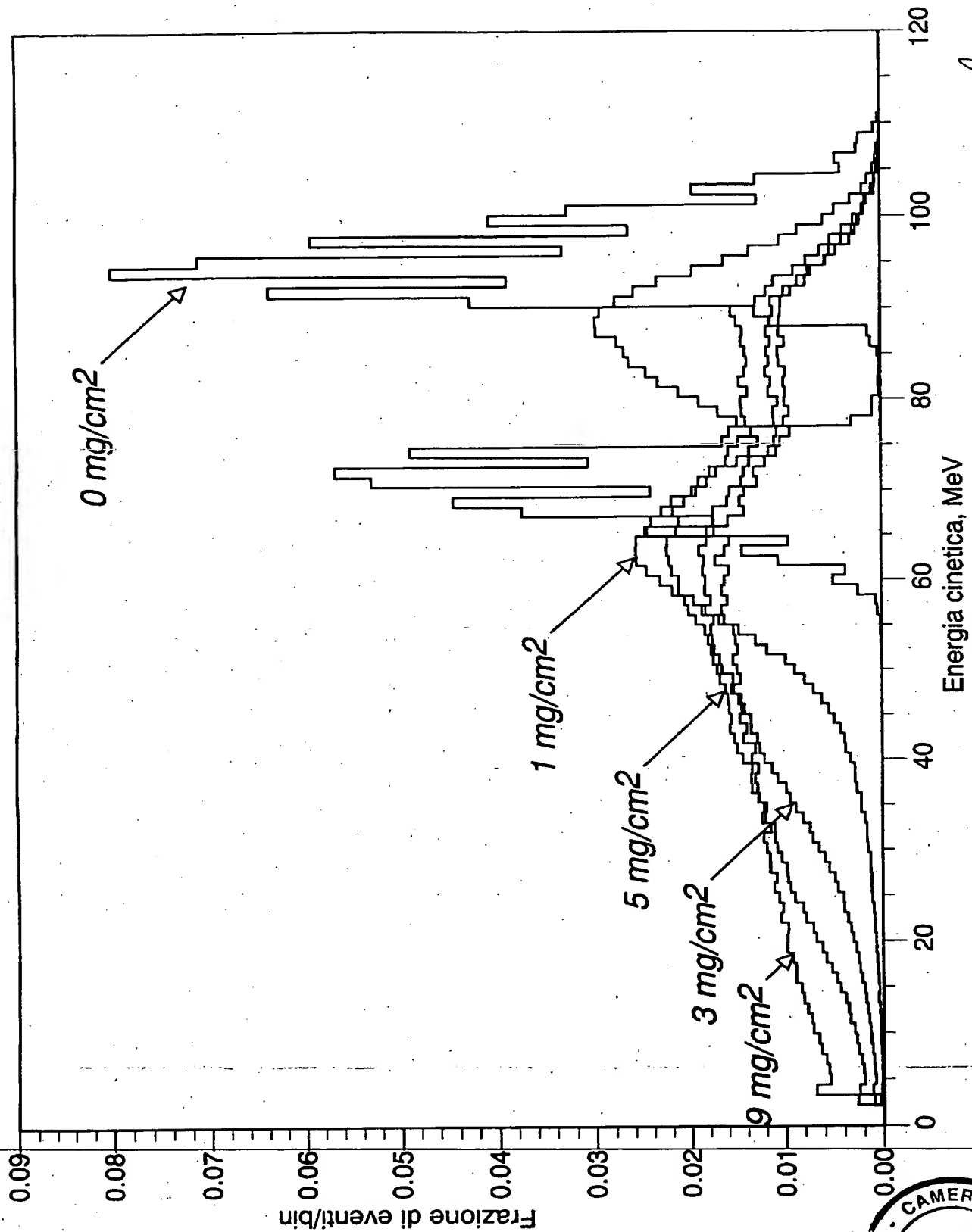
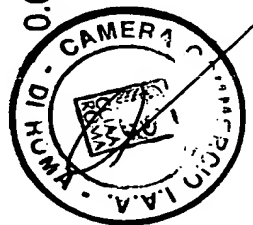


Figura 7

Maurizio SARPI
dello
Studio FERRARIO



RM2000 A 000521

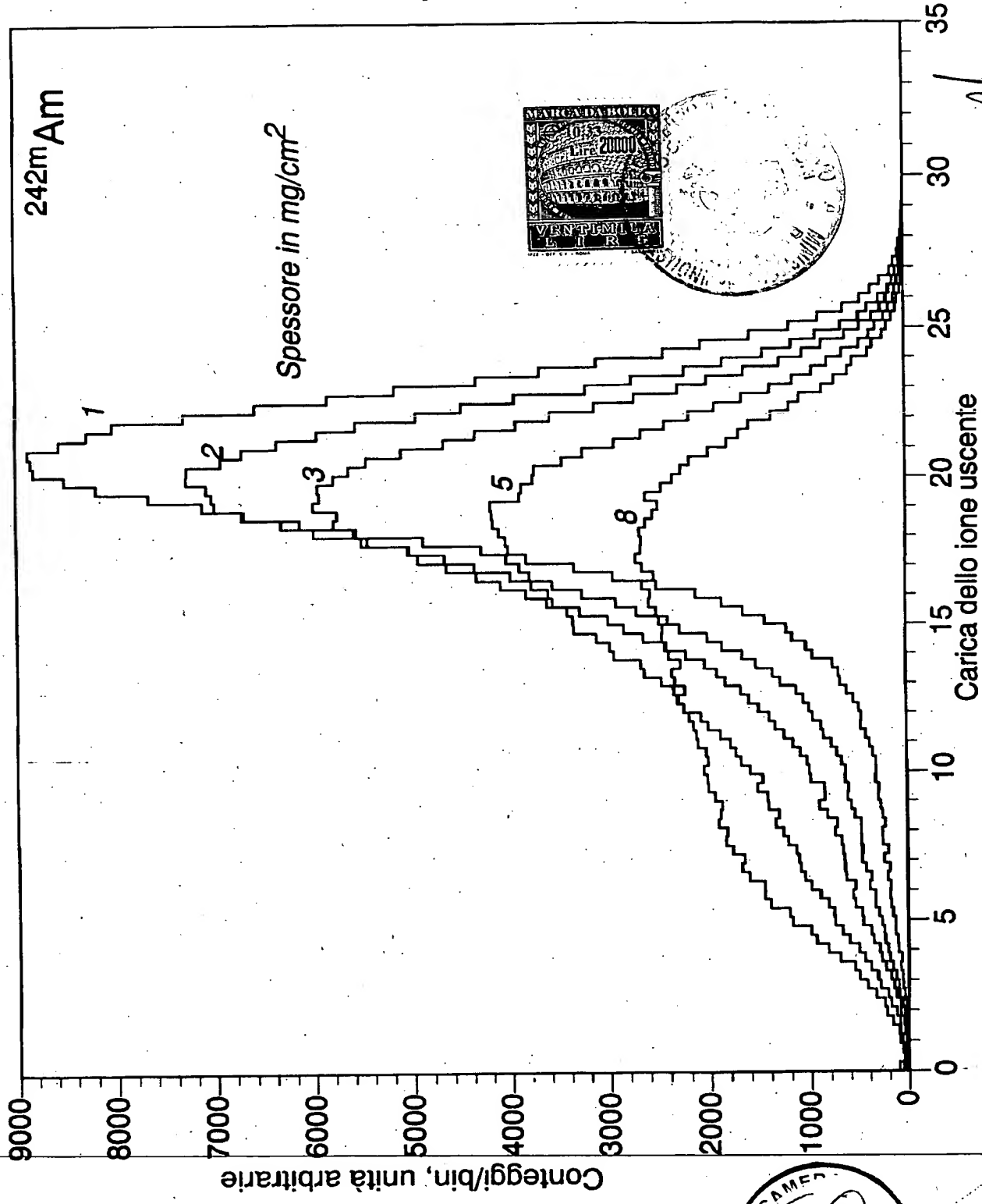
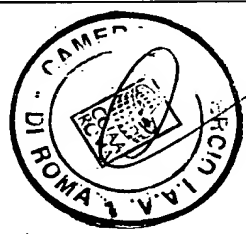


Figura 8

Maurizio SARPI
dello
Studio FERRARIO



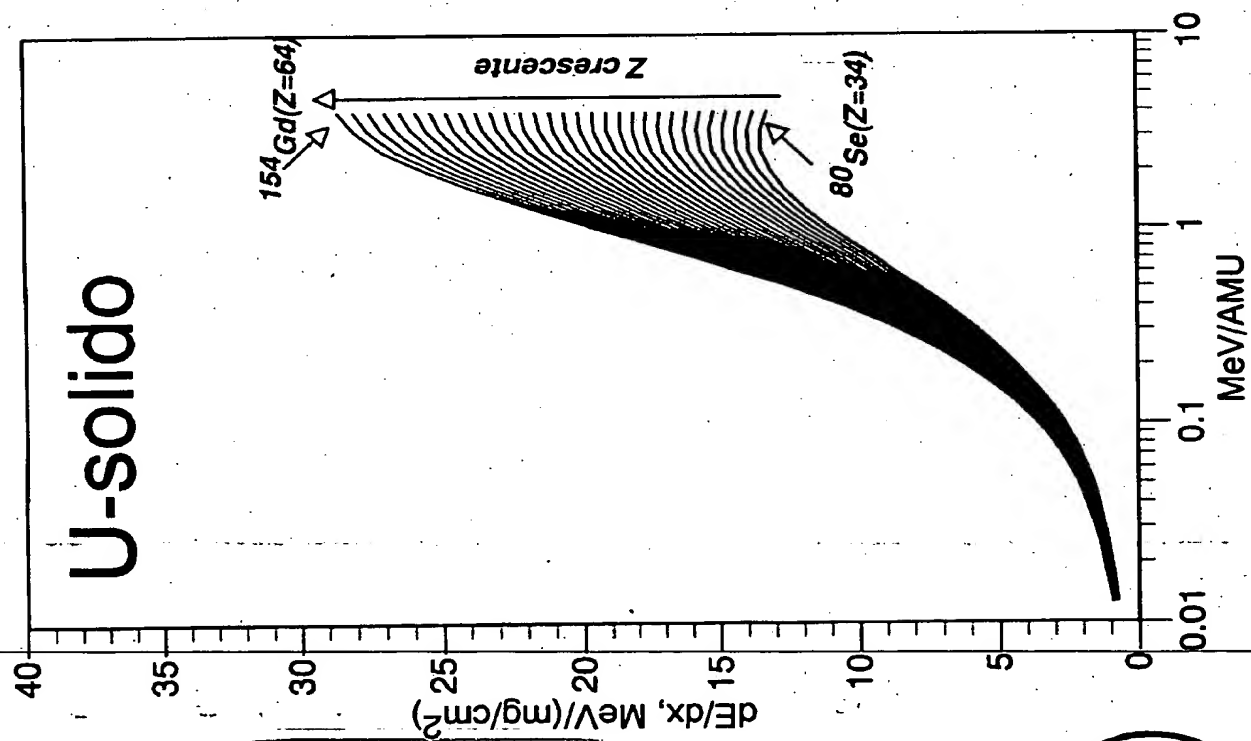
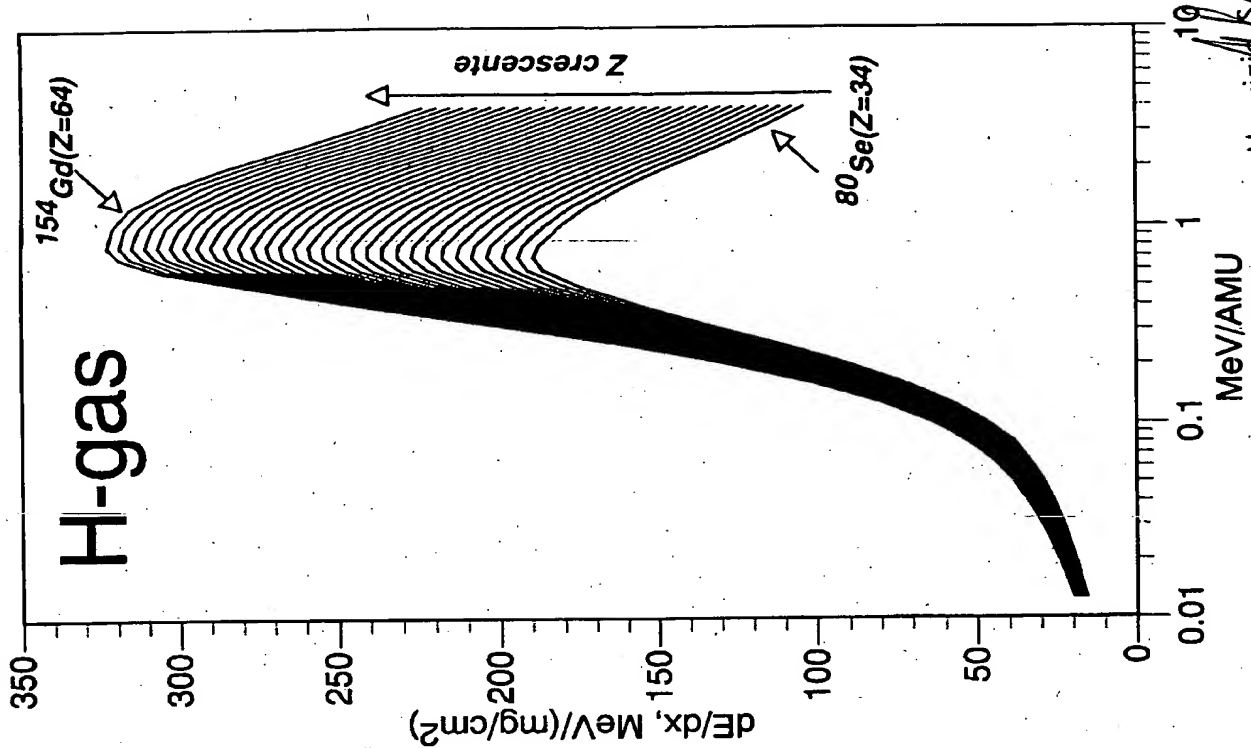
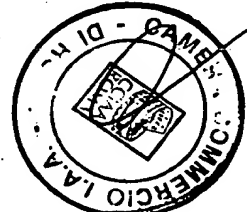


Figura 9

Maurizio SARPI
della
Studio FERRARIO



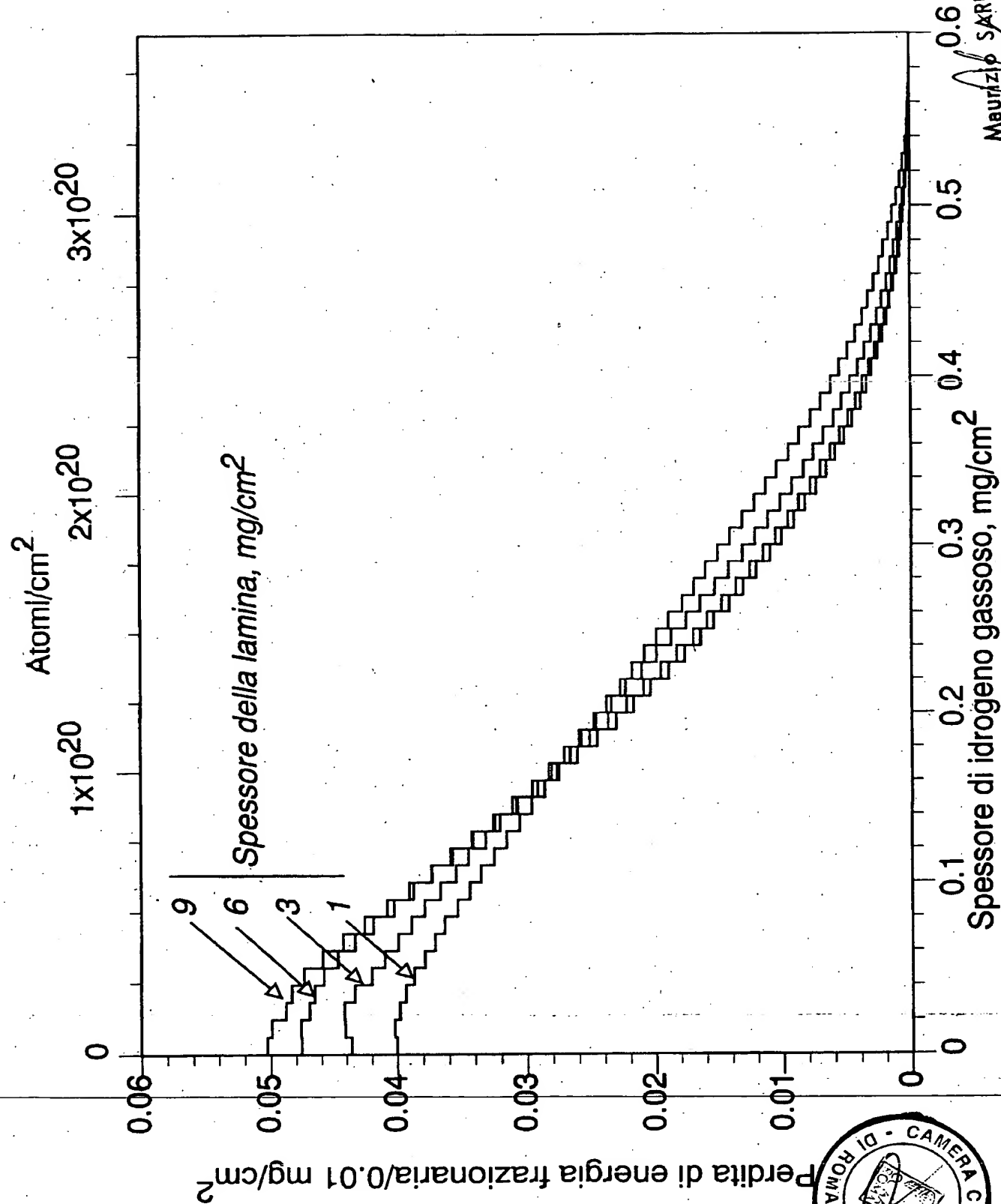
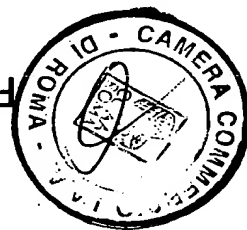


Figura 10

Maurizio SARPI
dallo
Studio FERRARIO



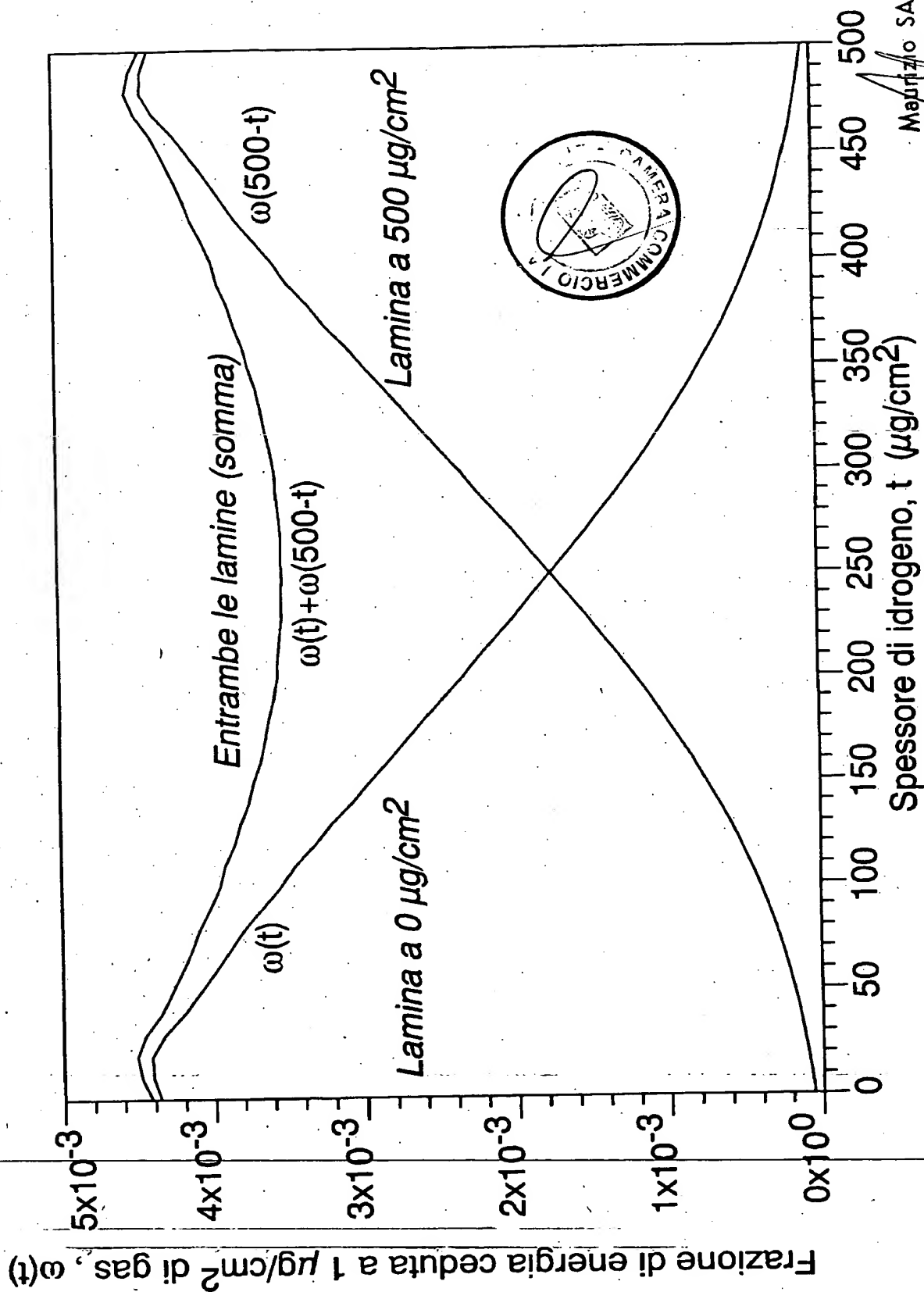
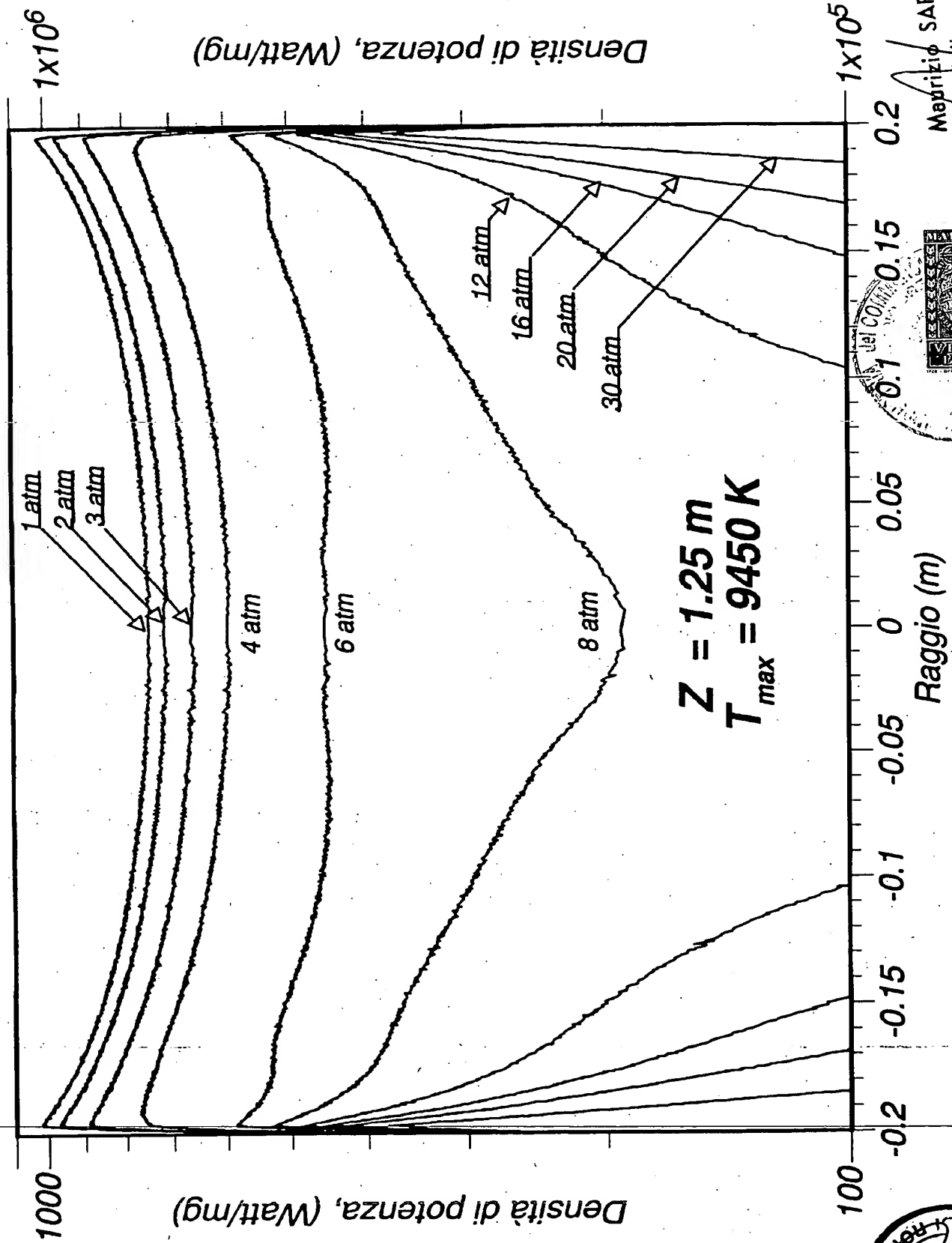


Figura 11

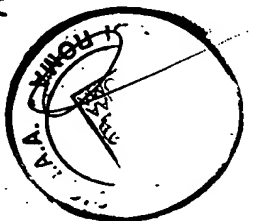
Matteo SARPI
Studio FERRARIO



Matteo SARPI
della
Studio FERRARIO



Figura 12



RM2000 A 0005211

Maurizio SARPI
della
Studio FERRARIO

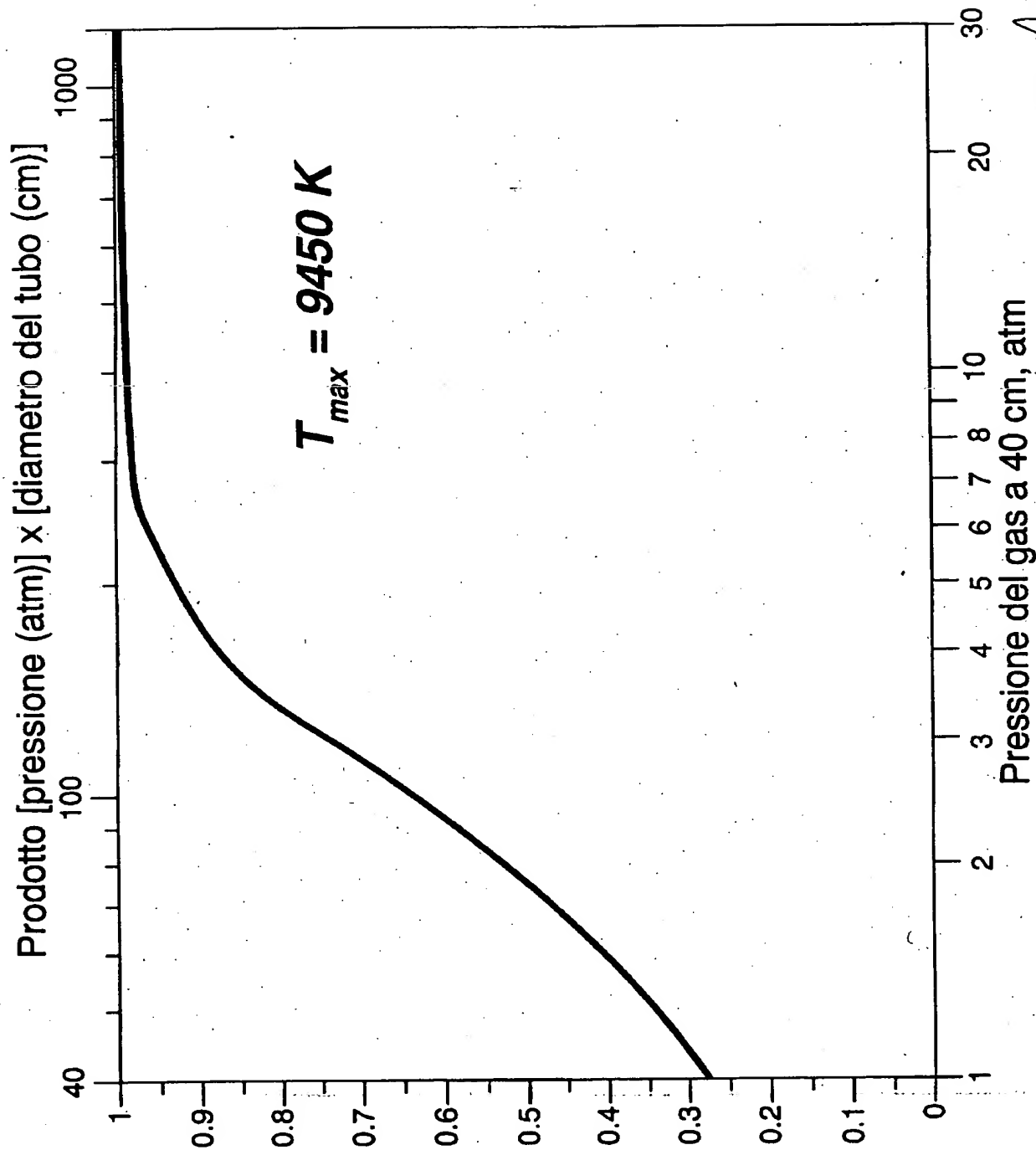
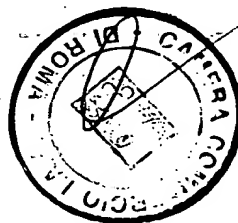


Figura 13

Frazione dell'energia esterna al combustibile ceduta al gas



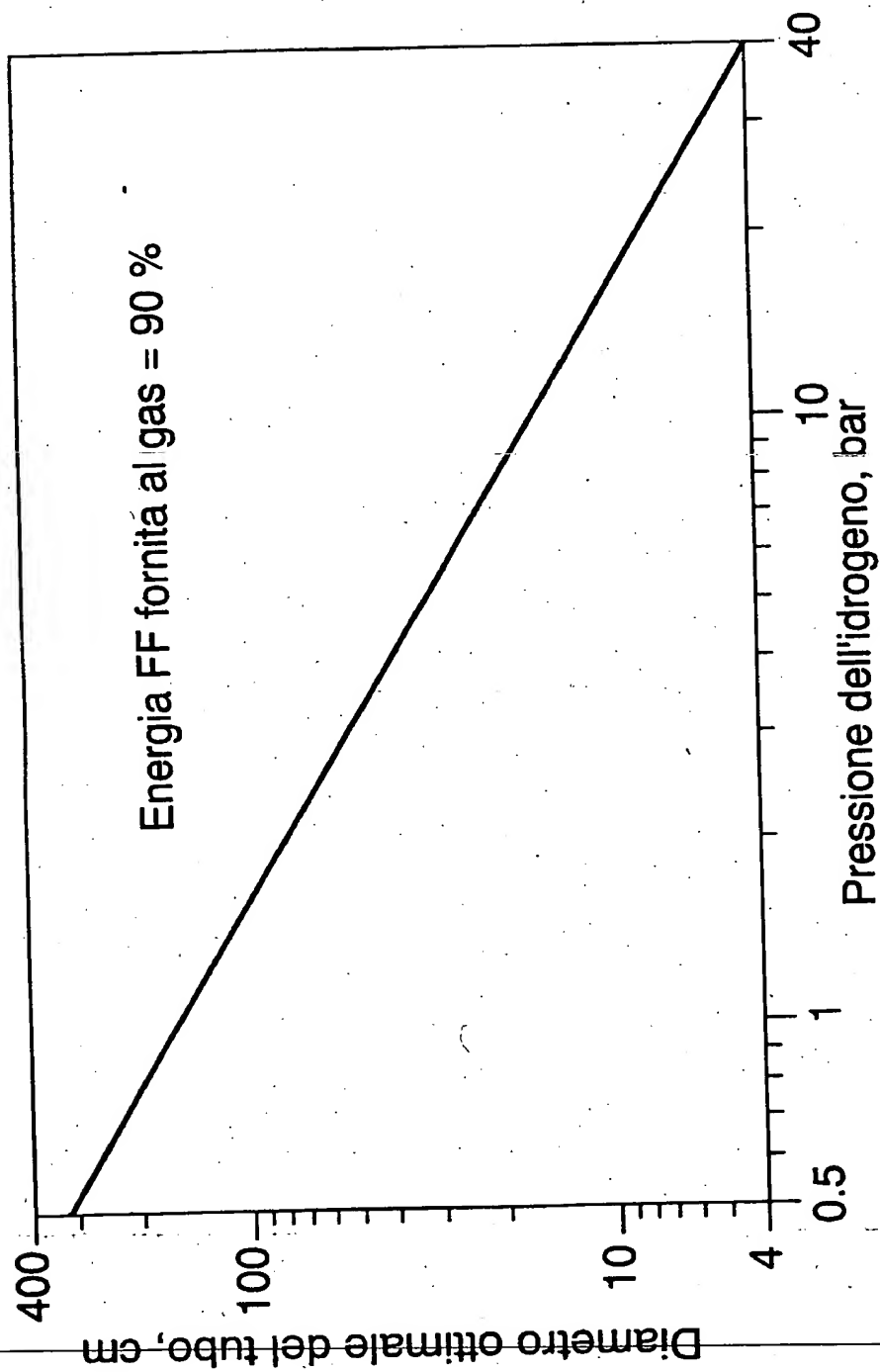


Figura 14

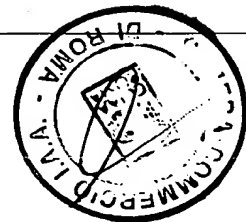
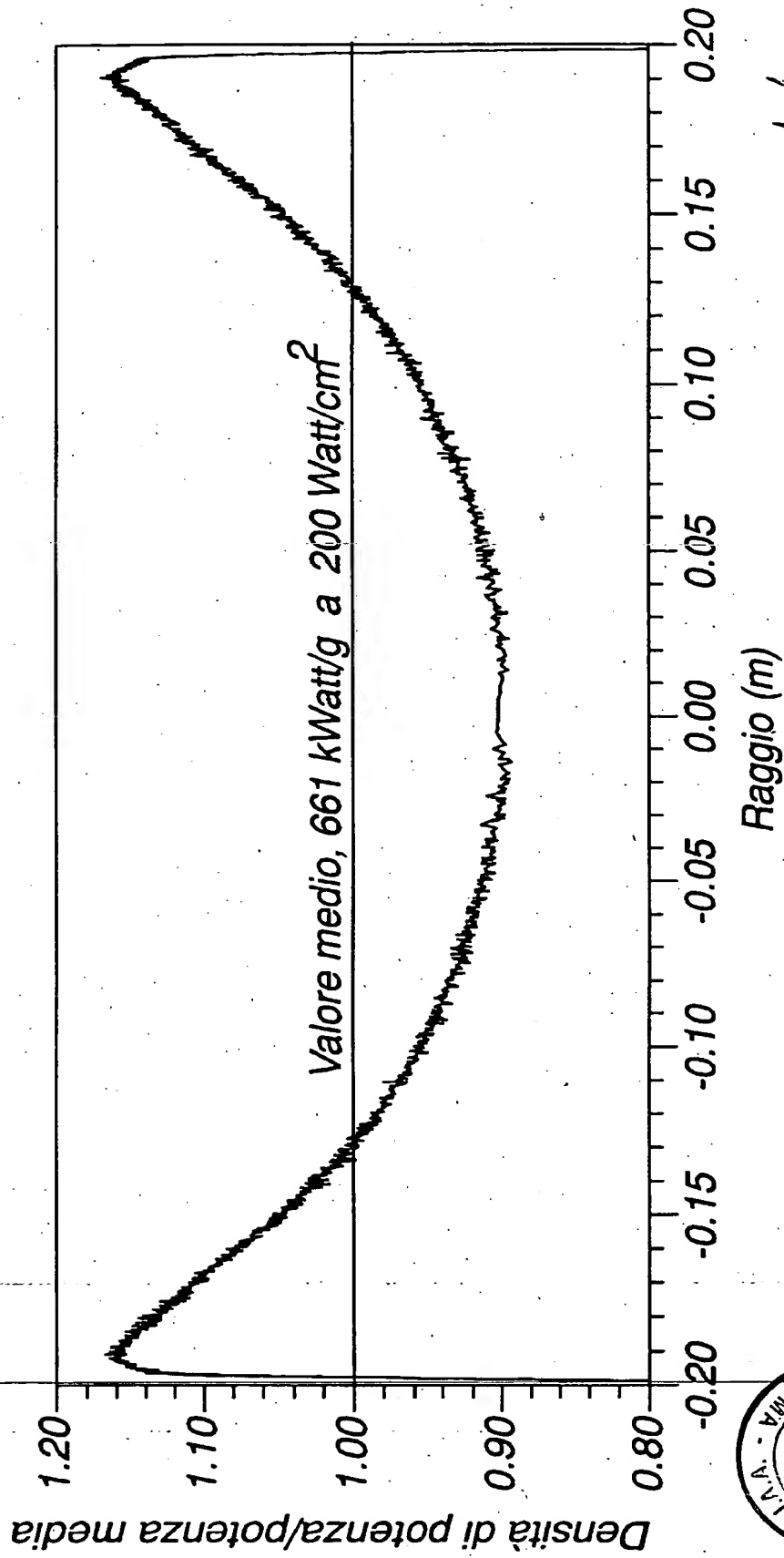


Figura 15

Maurizio SARPI
della
Studio FERRARIO

RM 2000 A 000521

Maurizio SARPI
della
Studio FERRARIO

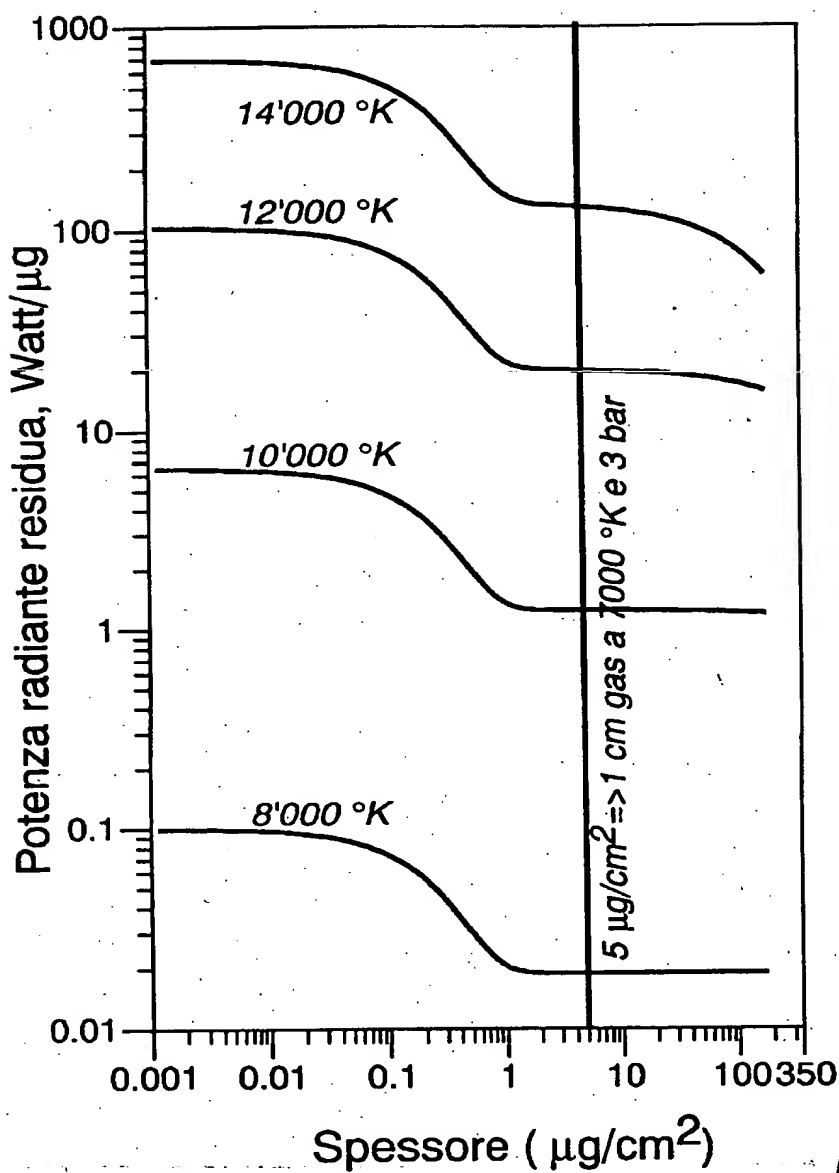


Figura 16

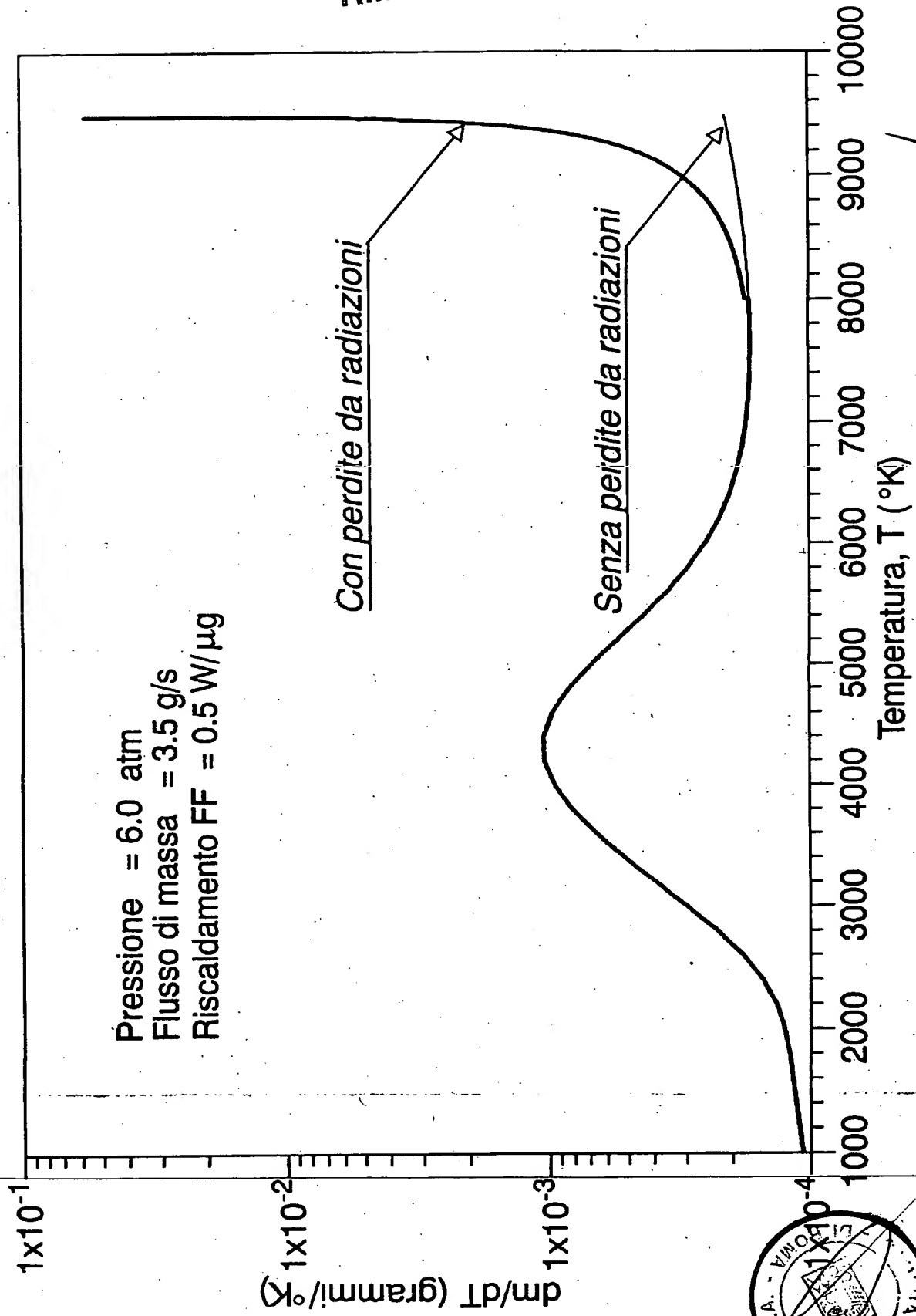
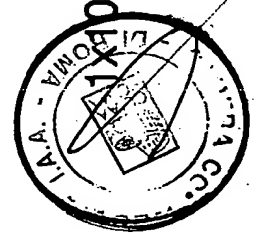


Figura 17

Maurizio SARPI
della
Studio FERRARIO



Frazione della potenza degli FF irradiata verso la lamina

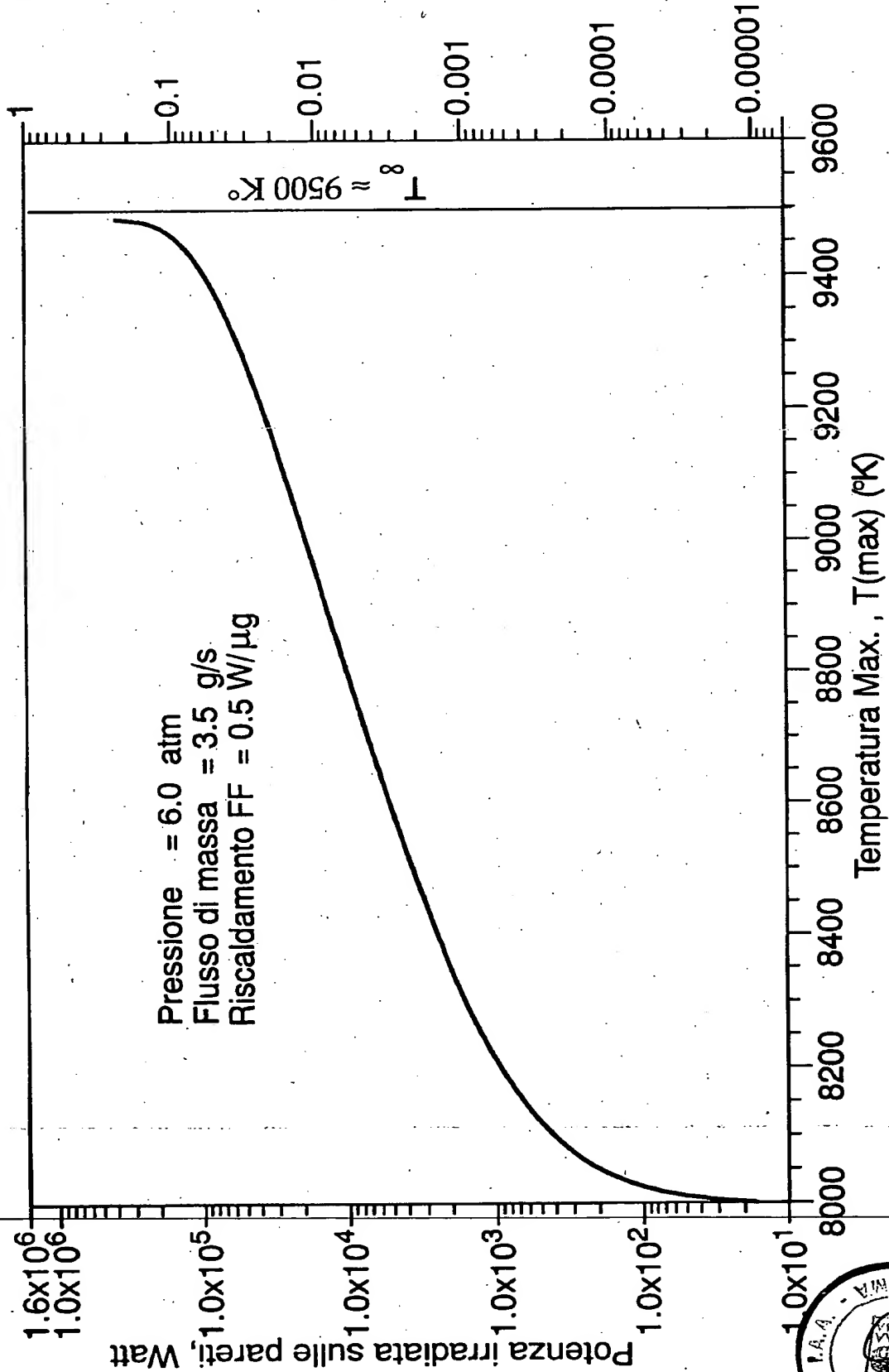
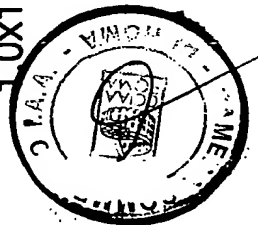
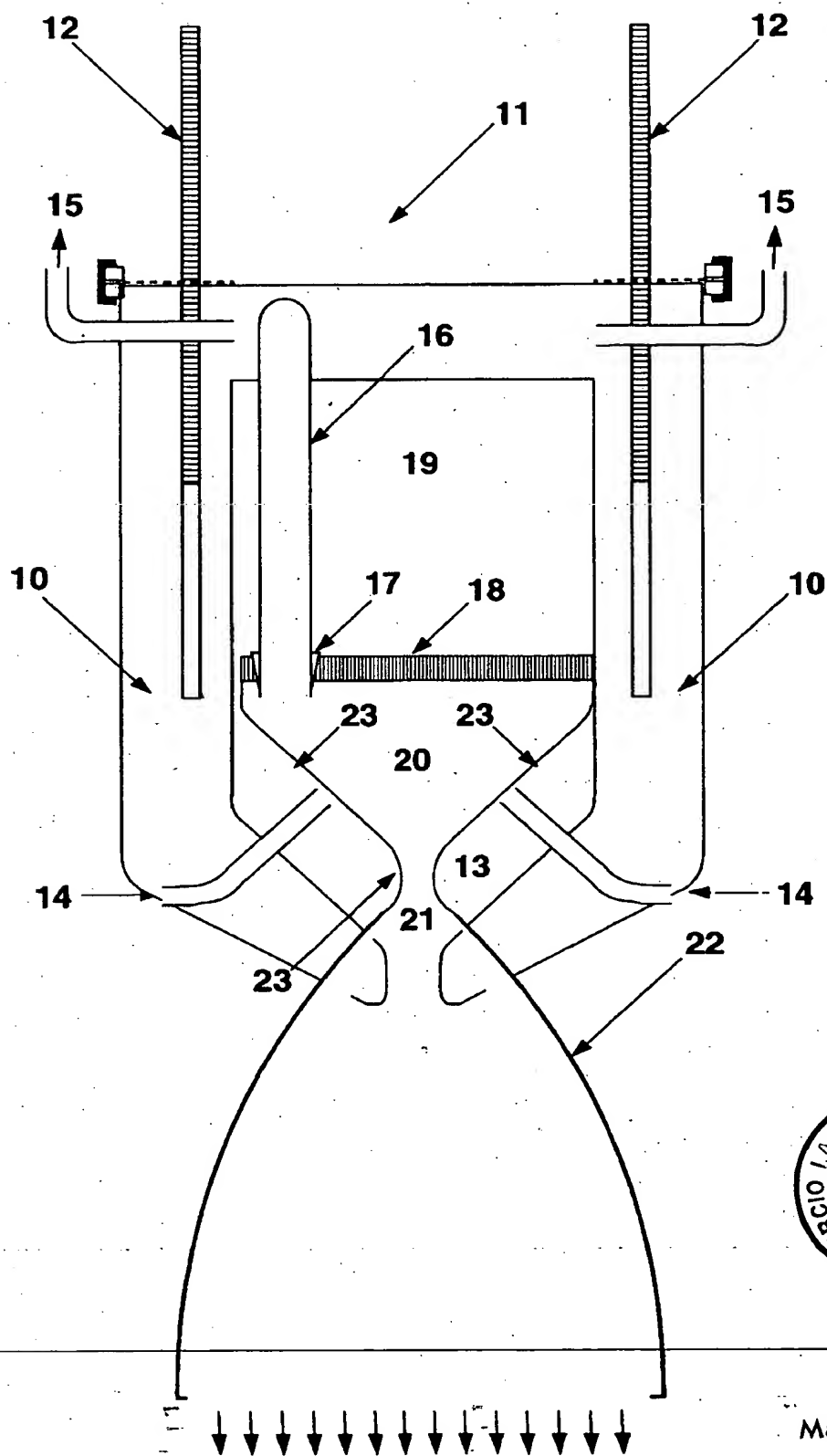


Figura 18

Maurizio SARPI
Studio FERRARIO



RM2000 A 000521



Maurizio SARPI
dello
Studio FERRARIO

RM 2000 A 00052 11

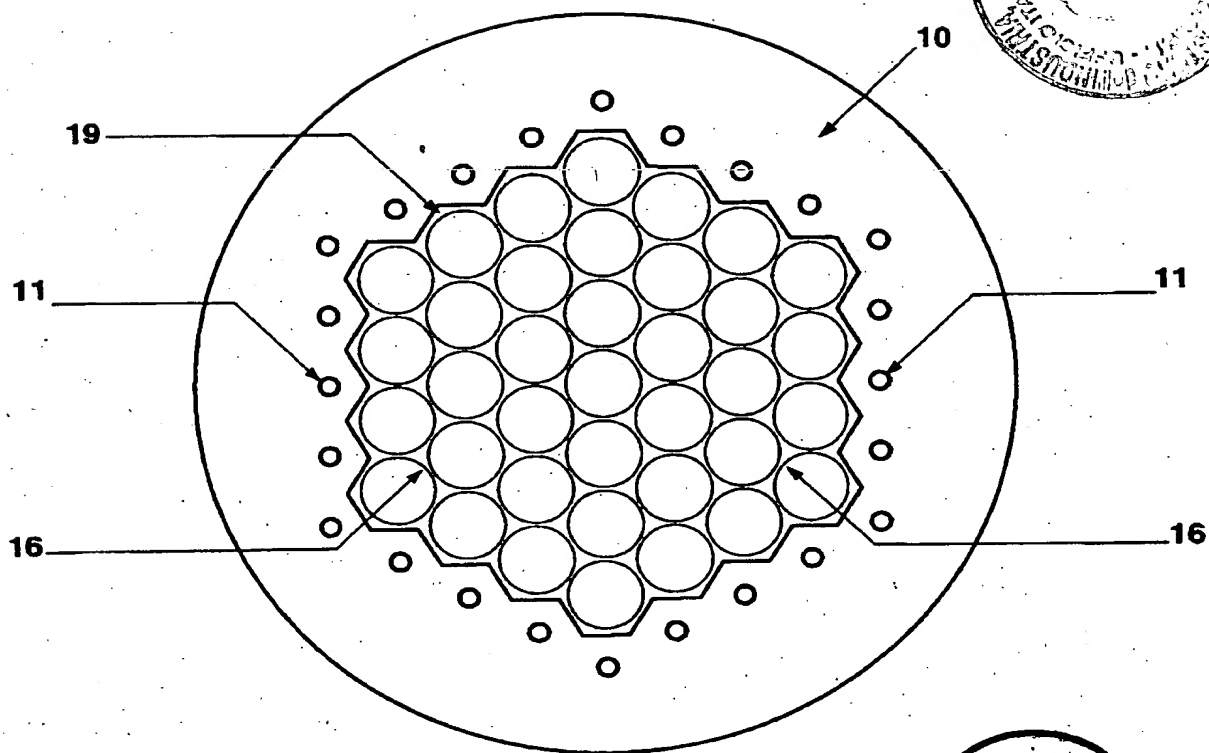
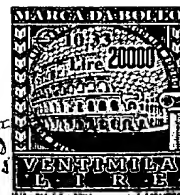


Figura 20

Maurizio SARPI
dello
Studio FERRARIO

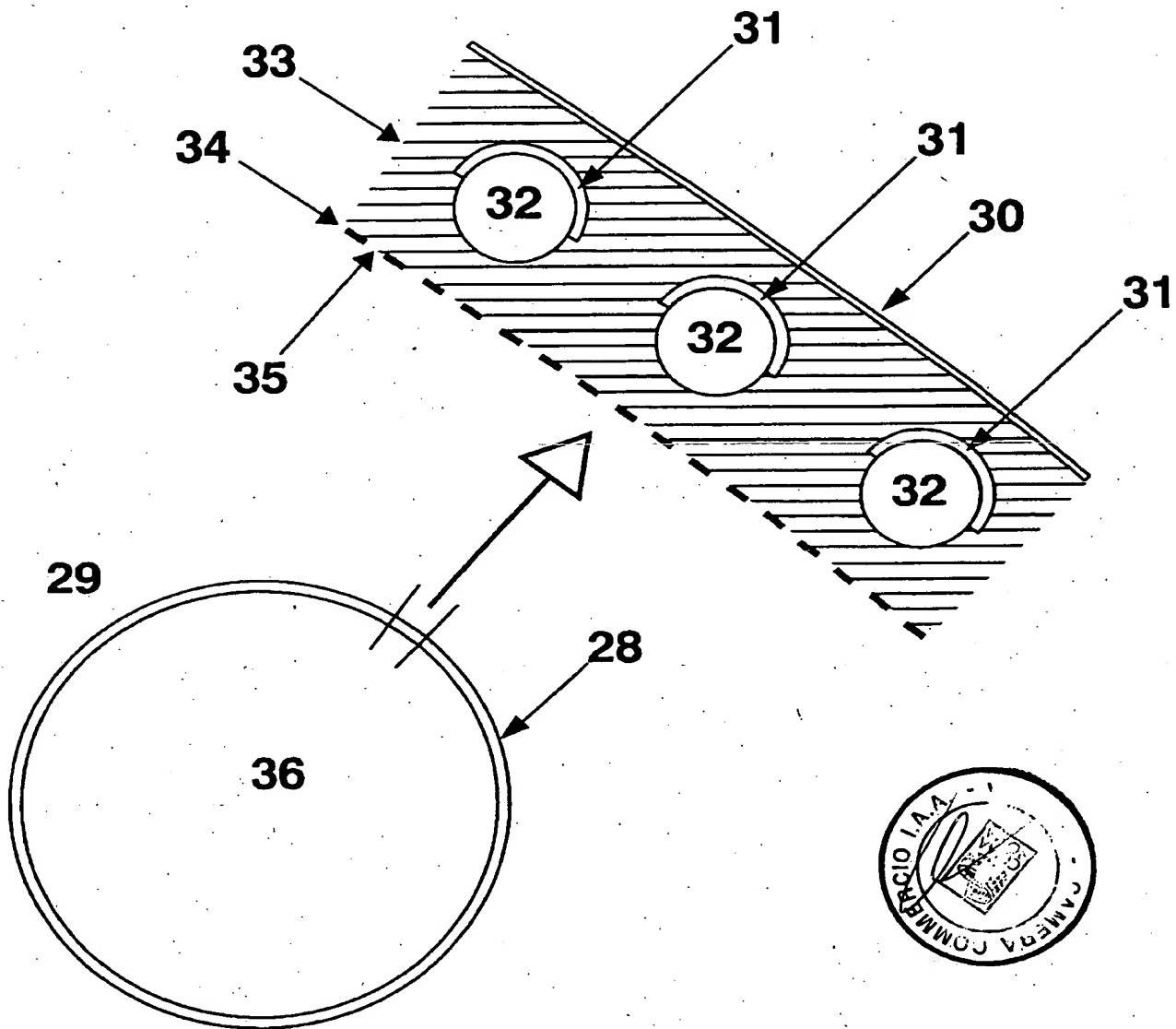


Figura 21

Maurizio SARPI
dello
Studio FERRARIO

RM 2000 A 000521

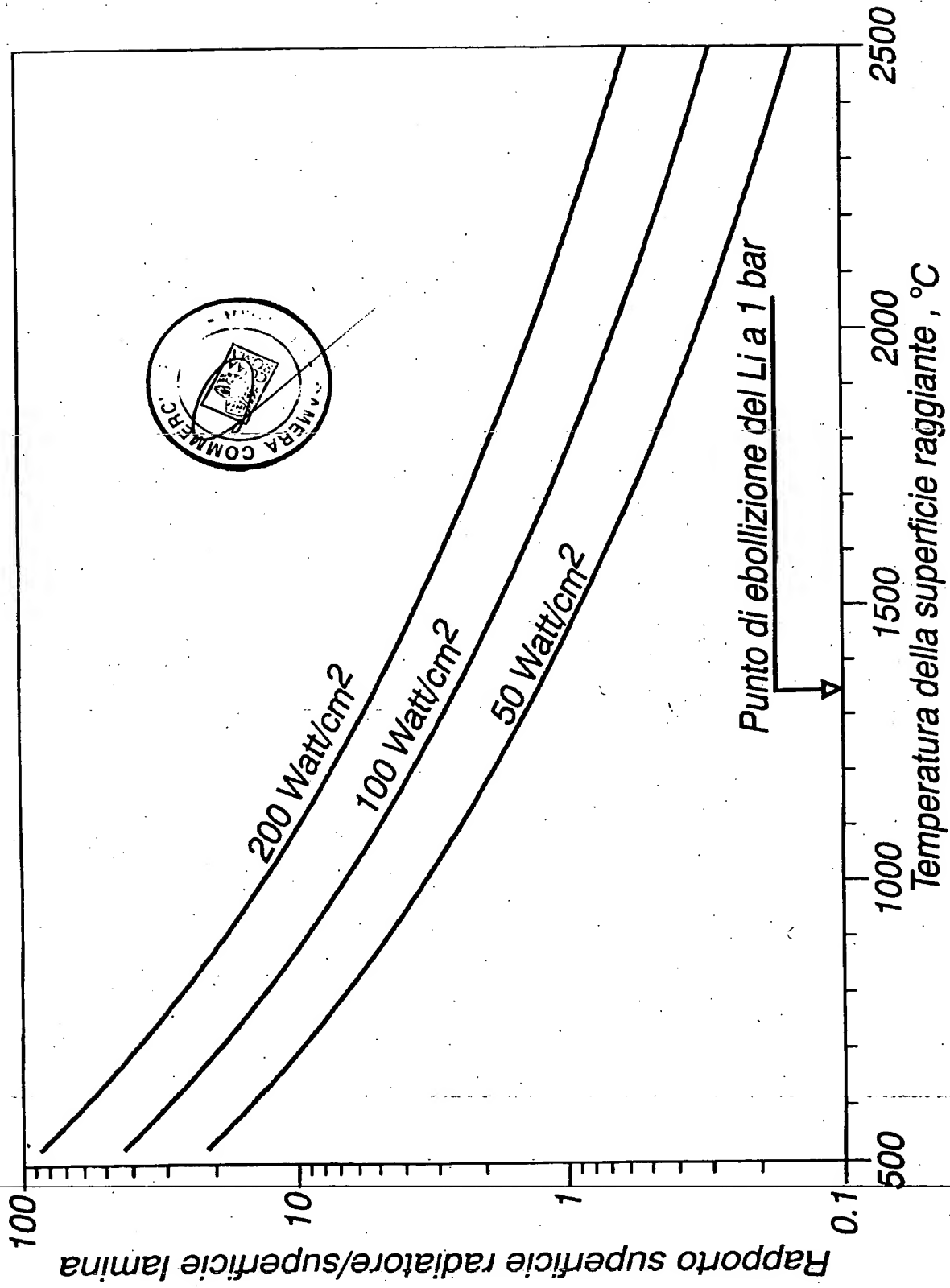


Figura 22

Maurizio SARPI
dello
Studio FERRARIO

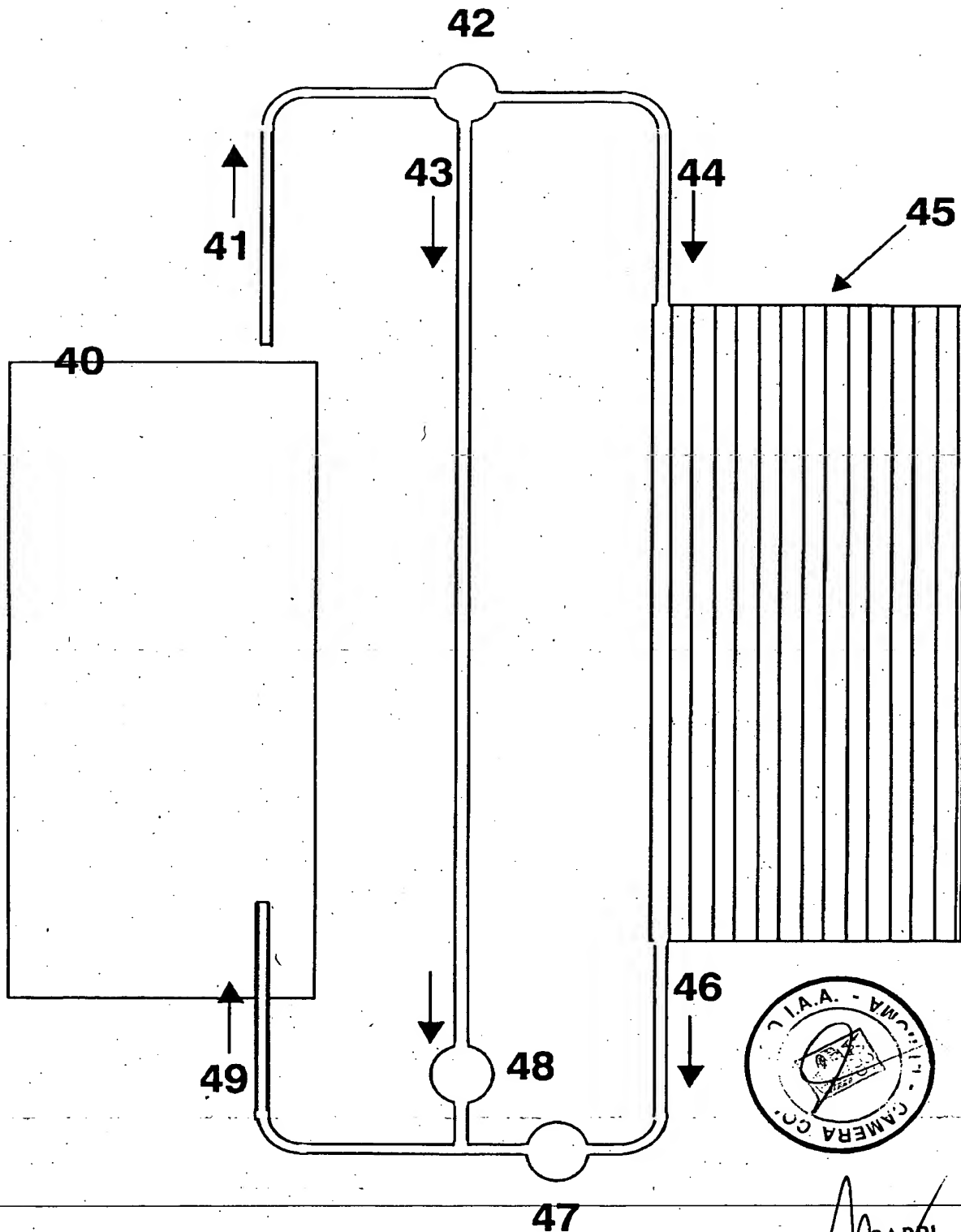


Figura 23

Maurizio SARPI
della
Studio FERRARIO

Impulso specifico, s-1

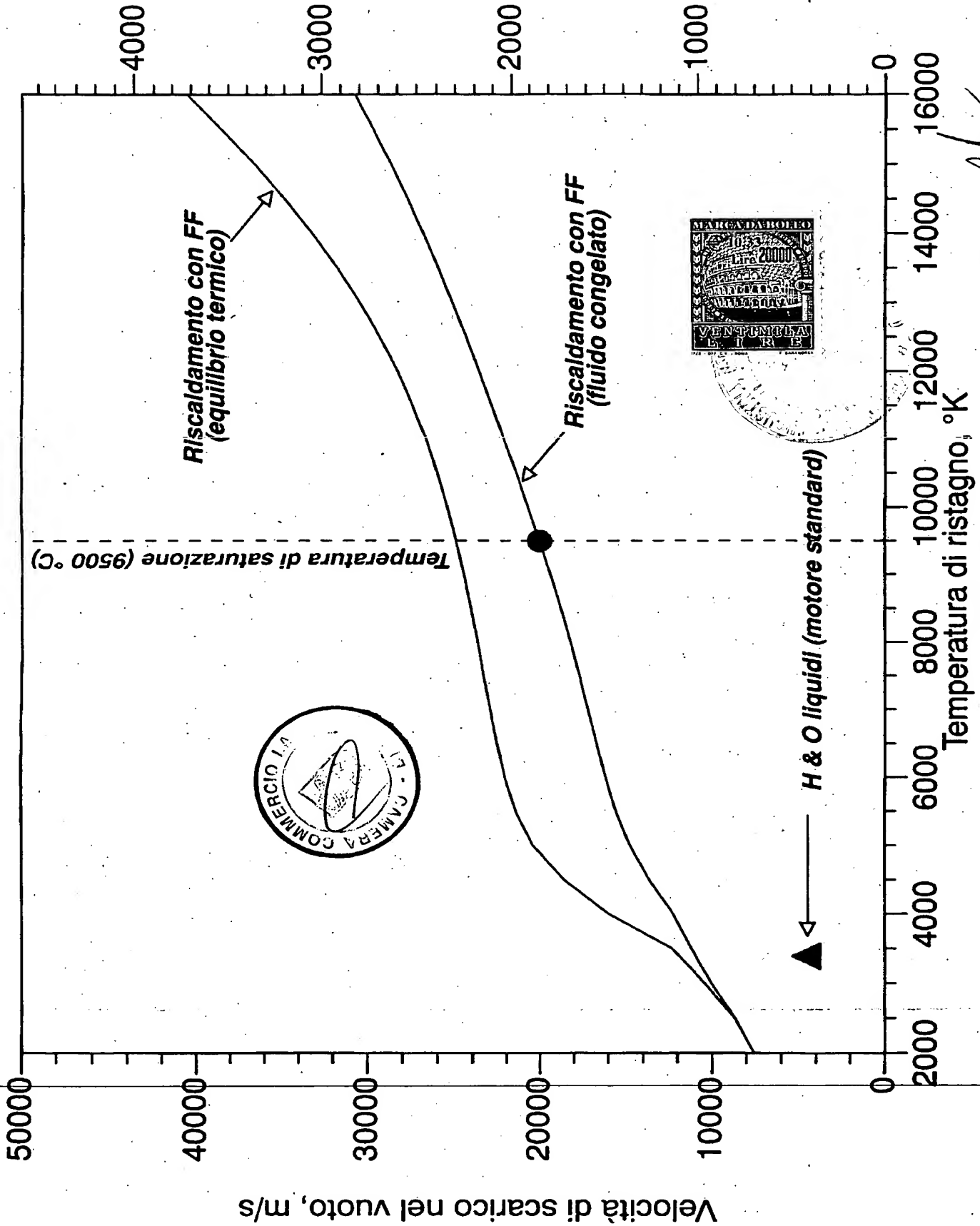


Figura 24

Maurizio SARPI
della
Studio FERRARIO